

# Trabajo Fin de Grado

## Estructuras resistentes en cubiertas de grandes luces

Autor

Gemma Arbués Pérez

Directores

José Cegoñino Banzo  
Amaya Pérez del Palomar Aldea

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Curso 2013-2014

# Estructuras resistentes en cubiertas de grandes luces

## RESUMEN

El uso de la estructura resistente como el elemento expresivo principal no siempre contribuye de manera sincera a la realidad del proyecto. El abandono de lo cuantitativo por centrarse en lo cualitativo hace que la estructura resistente pase a un segundo plano, dejando de ser una necesidad a ser una intención más en la arquitectura.

Veremos como el conocimiento de las leyes de redistribución de fuerzas para generar formas sinceras es el requisito indispensable para el diseño de cualquier sistema estructural y, por lo tanto, esencial para el diseño estructural. Pero este conocimiento no conlleva su aplicación, por lo que el modo más riguroso para comprobar la sinceridad estructural de los edificios es analizar su estructura a través del cálculo. De este modo, podemos obtener una respuesta objetiva para, así, analizar y reconsiderar su función con la arquitectura.

El método de los elementos finitos nos ayudará a obtener esta respuesta objetiva aplicando el cálculo sobre modelos de edificios reales, obteniendo conclusiones sobre la relación entre la forma de los mismos y su comportamiento resistente.

Para ello, estudiaremos tres cubiertas de grandes luces como son el Pabellón de Portugal de Siza, el Estadio de Braga de Souto de Moura y la Estación de Servicio “Los Enlaces” de Yarza. Estos ejemplos nos servirán para comprobar como las tres cubiertas suspendidas basan su forma catenaria en la distribución de esfuerzos.

## PALABRAS CLAVE

estructura resistente – sinceridad estructural – arquitectura – forma – cubierta – catenaria  
flujos de fuerzas – esfuerzos – tensiones – cables – contrafuertes – elementos finitos – cálculo

<b>1_ ARQUITECTURA Y ESTRUCTURA, Y VICEVERSA. INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>2_ LA NECESIDAD DE LA ESTRUCTURA. GENERALIDADES</b>	<b>6</b>
<b>3_ NORMAS Y LEYES. SISTEMAS DE ESTRUCTURAS</b>	<b>8</b>
_ Sistemas de Estructuras	9
<b>4_ SISTEMAS ESTRUCTURALES DE FORMA ACTIVA. CARACTERÍSTICAS</b>	<b>12</b>
<b>5_ EL MEF. FUNDAMENTOS</b>	<b>16</b>
_ ¿Qué es el Método de los Elementos Finitos?	16
_ ¿Cómo trabaja el MEF en la práctica?	16
_ ¿Cómo funciona el método?	17
_ Funciones de forma	18
_ Tipos de elementos finitos	19
<b>6_ CUBIERTAS DE GRANDES LUCES. CASOS DE ESTUDIO</b>	<b>21</b>
_ Pabellón De Portugal, Álvaro Siza	22
_ Estadio De Braga, Eduardo Souto De Moura	25
_ Estación De Servicio “Los Enlaces”, José De Yarza	28
<b>7_ MODELOS DE CÁLCULO</b>	<b>32</b>
_ Condiciones de apoyo y cargas exteriores. Hipótesis	32
_ Definición del modelo geométrico. Discretización y materiales	32
_ Modelos de cálculo	34
<b>8_ ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	<b>35</b>
_ Esfuerzos en los cables de acero. Valores de tracción y von mises	35
_ Esfuerzos en los pórticos de hormigón. Tensiones mínimas y máximas	39
<b>9_ LA ESTRUCTURA COMO ARQUITECTURA. CONCLUSIONES</b>	<b>44</b>
<b>10_ BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>47</b>
<b>11_ REFERENCIA DE IMÁGENES</b>	<b>47</b>
<b>12_ ANEXO</b>	<b>48</b>
1_ Coordenadas y planos. Pabellón De Portugal, Álvaro Siza	
2_ Coordenadas y planos. Estadio De Braga, Eduardo Souto De Moura	
3_ Coordenadas y planos. Estación De Servicio “Los Enlaces”, José De Yarza	
4_ Tipos de elementos. Mallado	
5_ Introducción de la geometría	

## 1\_ ARQUITECTURA Y ESTRUCTURA, Y VICEVERSA. INTRODUCCIÓN

Una parte de la arquitectura actual destaca por usar la **estructura resistente** como el **elemento expresivo** principal del edificio. Algunas estructuras resistentes que hasta ahora habían sido diseñadas y calculadas por ingenieros han pasado a ser diseñadas por arquitectos que, por un lado, buscan acentuar su dimensión plástica o, por otro, tienden a dulcificar esta capacidad resistente (fig.1). El abandono de lo cuantitativo por centrarse en lo cualitativo y expresivo ha dado ejemplos muy brillantes en bastantes ocasiones (fig. 2), pero, en otros casos, perjudica el entendimiento de lo resistente al primar, excesivamente, la apariencia de la estructura sobre lo que es la estructura en sí (fig. 3).



Fig. 1\_ Miguel Fisac  
Centro de Estudios Hidrográficos, 1963, Madrid



Fig. 2\_ John Utzon  
Ópera de Sydney, 1973, Sydney



Fig. 3\_ Santiago Calatrava  
Auditorio de Tenerife, 2003, Tenerife

Todo edificio tiene una estructura resistente hasta que deja de tenerla. Evidentemente, esta afirmación carece de sentido, dado que mientras exista gravedad y los materiales pesen será necesario un techo y, por lo tanto, existirá la estructura resistente. Sin embargo, ese sostener se puede entender de otra manera, aquella en la cual la estructura resistente está presente en los edificios hasta el punto que las **configura y determina** (fig. 4 a 6).



Fig. 4\_ Félix Candela  
Rte. Los Manantiales, 1958, México



Fig. 5\_ Eero Saarinen  
Aeropuerto de Dulles, 1962, Washington



Fig. 6\_ Pier Luigi Nervi  
Palazzetto dello Sport, 1960, Roma

En el siglo XIX empiezan a aplicarse los métodos y conocimientos científicos a la construcción, es aquí cuando las posibilidades que ofrece la tecnología son mayores que las necesidades que requieren la mayoría de las construcciones. Es, en este momento, cuando la estructura resistente deja de estar presente. De este modo, la estructura resistente podrá ser concebida en la arquitectura como una **intención**. Se pondrá en evidencia o no en función de los ideales del arquitecto que la plantee.

Arquitectos e ingenieros se enfrentan con sus respectivos puntos de vista a esta época en la que la estructura resistente no responde a un problema de necesidad, sino a una voluntad expresiva.

En definitiva, el problema que se plantea aquí es la gran diferencia de **sinceridad estructural**.



Así pues, existen tres tipos de arquitecturas atendiendo a su estructura: por un lado, aquellas en las que se pretende **ocultar toda muestra estructural** en el edificio (fig.7); por otro, las que quieren presentar la estructura como algo imprescindible, pero que realmente es **expresión plástica** de la tecnología (fig. 8); y, por último, aquellas donde la estructura las configura y determina y hacen de ella su **verdadera razón de ser** (fig. 9).



Fig. 7\_ Alberto Campo Baeza  
Casa Turégano, 1988, Madrid



Fig. 8\_ Frank Gehry  
Museo Guggenheim, 1997, Bilbao



Fig. 9\_ Kenzo Tange  
Estadio Nacional Yoyogi, 1964, Tokio

Y, ¿cómo se puede saber en un edificio si la estructura es el primer y único instrumento para generar forma y espacio en arquitectura? El modo más riguroso para comprobarlo es analizar su estructura aplicando el **cálculo estructural**. A través del cálculo se puede obtener una respuesta objetiva de la estructura y, de este modo, analizar y reconsiderar su función con la arquitectura.

Así pues, en primer lugar, veremos como la estructura puede generar una forma acorde a una geometría apropiada según los **flujos de fuerzas** a los que está sometida. Para ello, veremos los mecanismos para hacer frente a las fuerzas que actúan en una estructura, es decir, para redistribuirlas, y como esos mecanismos son utilizados en arquitectura. Pero, ¿se está haciendo uso de ellos porque son necesarios o porque son un mero elemento expresivo?

Para ello, dejaremos de lado todas aquellas obras donde la estructura no está considerada como elemento expresivo fundamental y nos centraremos en tres ejemplos que, como hemos dicho, hacen de la estructura su mayor virtud. El **Pabellón de Portugal** (1998) de Siza (fig. 10), el **Estadio de Braga** (2003) de Souto de Moura (fig. 11) y la **Estación de Servicio "Los Enlaces"** (1962) de Yarza (fig. 12) hacen uso de la catenaria para generar su arquitectura. De este modo, aplicaremos el método del cálculo estructural para dar respuesta científica y cuantificar su sinceridad estructural.



Fig. 10\_ Álvaro Siza  
Pabellón de Portugal, 1998, Lisboa



Fig. 11\_ Eduardo Souto de Moura  
Estadio de Braga, 2003, Braga



Fig. 12\_ José de Yarza  
E. S. "Los Enlaces", 1962, Zaragoza

Una vez obtengamos resultados del cálculo, seremos capaces de sacar conclusiones y responder a preguntas como: ¿es sincera su estructura? ¿su forma está determinada por cuestiones expresivas o estructurales? ¿hasta qué punto puede optimizarse su estructura sin perder esas cuestiones expresivas?

## 2\_ LA NECESIDAD DE LA ESTRUCTURA. GENERALIDADES

La estructura es el primer y único instrumento para la generación de la forma y el espacio en la arquitectura. De ella depende **otorgar resistencia**: sin estructura, las formas materiales no pueden ser preservadas. De este modo, puede afirmarse que las estructuras determinan de manera fundamental los edificios, ya que su diseño es una decisión arquitectónica importante. Así pues, la diferencia entre el diseño estructural y las formas arquitectónicas precisa ser disuelta.



Fig. 13\_ Panteón de Agripa, 125, Roma

La necesaria existencia de una estructura resistente impone condicionantes rigurosos a la arquitectura y es, de hecho, un importante factor de orden a la vez que ha sido, hasta bien entrado el siglo XX, el mayor reto con el que se enfrentaba la edificación. Actualmente, el **reto técnico es de orden menor** dado que podemos realizar construcciones de mayores dimensiones y predecir su comportamiento con gran precisión. Pero para cada problema hay infinidad de soluciones alternativas que tienen una expresión geométrica concreta que, o bien forma parte de la solución arquitectónica, o bien puede ser ocultada (aun en ese caso necesita de una geometría que no puede ser determinada de forma arbitraria). Es evidente que, debido a su escala, los edificios en altura y de grandes luces pertenecen a este primer grupo, ya que suele resultar difícil ocultar la presencia de su estructura. El contorno resultante puede producir un impacto poderoso en el exterior del edificio, especialmente en las estructuras de grandes luces, así como la forma de los espacios interiores. Por ello, el grado de implicación de la estructura exige que deba ser considerada en profundidad desde el principio del diseño.



Fig. 14\_ Skyline de algunos de los rascacielos más altos del mundo



Fig. 15\_ Joao Villanovas Artigas.  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 1948, Sao Paulo

Es evidente que la **escala** es fundamental para determinar la forma estructural. En estructuras relativamente pequeñas, como un unifamiliar o un bloque de oficinas, los requisitos estructurales pueden resolverse mediante sistemas sencillos. Sin embargo, en las estructuras de gran tamaño, las diferentes cargas gravitatorias, sísmicas y de viento a menudo restringen los materiales que pueden emplearse, al mismo tiempo que los distintos métodos constructivos condicionan el **funcionamiento del sistema estructural**.

Por otro lado, las estructuras de gran tamaño presentan **poca redundancia**, ya que están sujetas a la posibilidad de un colapso catastrófico en caso de que falle algún elemento clave en la estructura, dado que hay pocas posibilidades para redistribuir las cargas a las que está sometida entre otros elementos en caso de que alguno falle.

Por ello, para el desarrollo de este trabajo, nos centraremos en **cubiertas de grandes luces**. Este tipo de estructuras recoge los motivos explicados anteriormente: una cubierta es una parte fundamental en un edificio por lo que debe otorgar resistencia, gracias a los avances técnicos cada vez somos capaces de realizar luces de mayor tamaño, debido a la escala será necesario elegir un sistema estructural que armonice el diseño y el modo de trabajar, y, lo más importante, una cubierta de grandes luces presenta poca redundancia, ninguno de sus elementos es superfluo a la hora de repartir las cargas, por lo que es fácil de pensar que sea una estructura sincera.



Fig. 16\_ Eduardo Torroja.  
Hipódromo de la Zarzuela, 1941, Madrid

### 3\_ NORMAS Y LEYES. SISTEMAS DE ESTRUCTURAS

Para salvar una gran luz es imprescindible obtener una estructura que asegure la **estabilidad, resistencia y rigidez** (limitar la deformación) frente a los diferentes casos de carga que vayan a presentarse (o pudieran presentarse hipotéticamente) a lo largo de su vida útil.

La rigidez y la estabilidad de la estructura, derivada de su geometría, ha sido el hilo conductor del desarrollo de estas construcciones. En esta línea, conocidos son los ejemplos que tenemos de las cascaras de hormigón de Torroja (fig. 17) y Nervi (fig. 18), de las estructuras de Candela, de las membranas de Frei Otto (fig. 19) o de las formas orgánicas de Gaudí. En estos ejemplos es imposible separar los términos estructura y arquitectura, ya que son un todo.

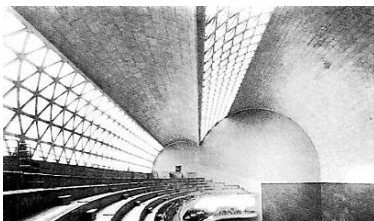


Fig. 17\_ Eduardo Torroja  
Frontón Recoletos, 1936, Madrid



Fig. 18\_ Pier Luigi Nervi  
Hangar en Orvieto, 1935, Orvieto



Fig. 19\_ Frei Otto  
Pabellón Alemán, 1967, Montreal

De este modo, la estructura se basa en las leyes de las ciencias naturales. A diferencia de las normas de diseño arquitectónico, las **leyes estructurales** son como una norma absoluta. Para conseguir que una estructura sea lo más sincera posible lo que necesitamos es que esas normas que definen la forma arquitectónica sean, además, una ley.

Parece que el problema es sencillo de resolver: identificar en que se basan las leyes estructurales con el objetivo de poder manejarlas para definir la forma arquitectónica (sincera).

Las leyes estructurales no son otras que aquellas que hacen frente a las fuerzas a las cuales está sometida una estructura. Estas fuerzas continuamente desafían y amenazan la forma de la estructura, por lo que estas leyes deben asegurar el equilibrio del conjunto mediante la redistribución de estas fuerzas actuantes, garantizando que sus flujos estén contenidos dentro de la geometría de los elementos de la estructura. Estas fuerzas no son otras que el peso **propio de la estructura** (consecuencia del propio peso de los materiales bajo la acción de la gravedad) y las **acciones externas** a las que está sometida (viento, nieve, sismo...).

Tanto en la naturaleza como en la técnica existen cuatro mecanismos para hacer frente a las fuerzas que actúan, es decir, para redistribuirlas:

#### Ajustar las fuerzas

Este mecanismo busca principalmente trabajar a través de la forma del material. Hace trabajar a la estructura bajo tensiones simples, es decir, fuerzas de compresión o tracción. Podría afirmarse que es el mecanismo básico para generar estructuras lo más sinceras.

### Separar las fuerzas

Este mecanismo actúa a través de barras sometidas a compresión y tracción. Busca transformar los esfuerzos de flexión en esfuerzos axiales, mucho más sencillos.

### Confinar las fuerzas

Este mecanismo actúa básicamente a través de la sección transversal y la continuidad del material. En este caso, la fuerza principal que actúa en la sección es la flexión.

### Dispersar las fuerzas

Este mecanismo actúa principalmente a través de la longitud y la forma de la superficie. Se basa en las fuerzas de tensión de la superficie, es decir, en las fuerzas de membrana.

El conocimiento de estas leyes de redistribución de fuerzas para generar forma es el requisito para el diseño de cualquier sistema estructural y, por lo tanto, esencial para el diseño estructural.

## \_ Sistemas de Estructuras

Así pues, una vez hemos identificado los mecanismos que hacen frente a las fuerzas a las cuales puede estar sometida una estructura, podemos identificar cuatro sistemas de estructuras que se basen en ellos. De este modo, podemos dominar las leyes estructurales y hacer que sean la norma de diseño que defina nuestra arquitectura y, por lo tanto, haga que la estructura sea lo más sincera posible.

Estos sistemas estructurales son:

### Sistemas de estructuras de forma activa

Son sistemas de **material flexible**, no rígido, en los que la transmisión de cargas se realiza a través del diseño de una forma adecuada y una estabilización característica de la forma. Debido a que está basado en el mecanismo de ajuste de fuerzas basado en la forma, podría afirmarse que es el sistema para generar estructuras lo más sinceras.

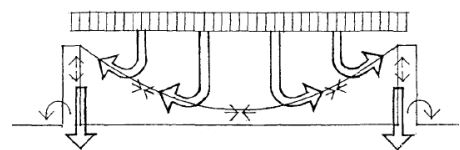


Fig. 20\_ Diagrama de estructura de forma activa

\_ Tipo de estructuras: de cables, en tienda, neumáticas y de arcos.

\_ Ejemplos: Pabellón de Portugal de Álvaro Siza (fig. 21), Estadio de Braga de Souto de Moura (fig. 22), Estación de Servicio Los Enlaces de José de Yarza (fig. 23).



Fig. 21\_ Álvaro Siza  
Pabellón de Portugal, 1998, Lisboa

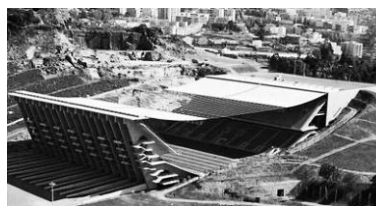


Fig. 22\_ Eduardo Souto de Moura  
Estadio de Braga, 2003, Braga



Fig. 23\_ José de Yarza  
E. S. "Los Enlaces", 1962, Zaragoza

### Sistemas de estructuras de vector activa

Son sistemas de elementos lineales cortos, sólidos y rectos (**sistemas de barras**) en los que la transmisión de fuerzas se realiza mediante descomposición vectorial, es decir, a través de una subdivisión en fuerzas axiales, de compresión y tracción.

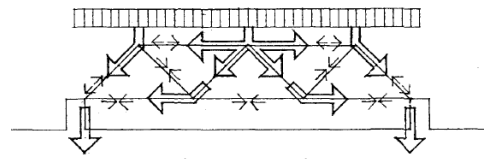


Fig. 24\_ Diagrama de estructura de vector activo

\_ Tipo de estructuras: cerchas planas, cerchas curvas y mallas espaciales.

\_ Ejemplos: Gimnasio Maravillas en Madrid de de la Sota (fig. 25), Centro Pompidou en París de Piano y Rogers (fig. 26), Cúpula Geodésica de Fuller (fig. 27).



Fig. 25\_ Alejandro de la Sota  
Gimnasio Maravillas, 1962, Madrid

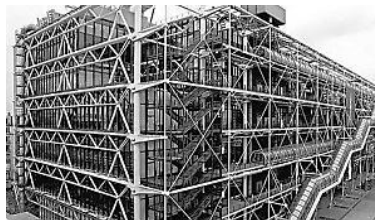


Fig. 26\_ Renzo Piano, Richard Rogers  
Centro Pompidou, 1977, París

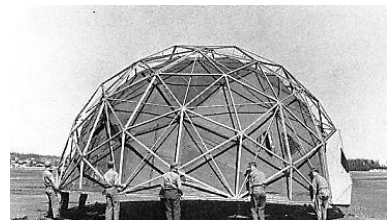


Fig. 27\_ Richard Buckminster Fuller  
Cúpula geodesic, 1950

### Sistemas de estructuras de sección activa

Son sistemas de elementos lineales rígidos y macizos en los que la transmisión de cargas se efectúa a través de la movilización de **fuerzas de sección**.

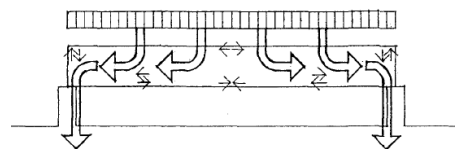


Fig. 28\_ Diagrama de estructura de sección activa

\_ Tipo de estructuras: vigas, pórticos, retículas de vigas y losas.

\_ Ejemplos: Galería Nacional de Berlín de Mies (fig. 29), Crown Hall en el ITT de Mies (fig. 30), Casa de la Cascada en Pensilvania de Wright (fig. 31).



Fig. 29\_ Mies van der Rohe  
Galería Nacional, 1968, Berlín



Fig. 30\_ Mies van der Rohe  
Crown Hall-ITT, 1956, Chicago



Fig. 31\_ Frank Lloyd Wright  
Casa de la Cascada, 1939, Pensilvania

### Sistemas de estructuras de superficie activa

Son sistemas de **superficie flexibles**, pero resistentes a tracciones, compresiones y esfuerzos cortantes, en los que la transmisión de las fuerzas se realiza a través de la resistencia de las superficies y una determinada forma de las superficies.

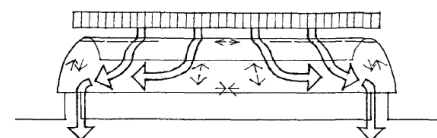


Fig. 32\_ Diagrama de estructura de superficie activa

\_ Tipo de estructuras: láminas y membranas.

\_ Ejemplos: Terminal Omnibus en Salto (fig. 33) y Agroindustrias Massaro en Canelones de Eladio Dieste, Hipódromo de la Zarzuela y Frontón Recoletos de Torroja (fig. 34).



Fig. 33\_ Eladio Dieste  
Terminal Omnibus, 1974, Salto

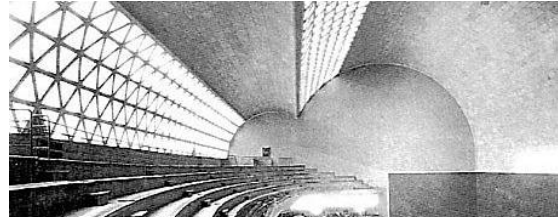


Fig. 34\_ Eduardo Torroja  
Frontón Recoletos, 1936, Madrid



#### 4\_ SISTEMAS ESTRUCTURALES DE FORMA ACTIVA. CARACTERÍSTICAS

Los sistemas estructurales de forma activa son sistemas portantes de material flexible, no rígido, en los que la transmisión de cargas se efectúa a través de una forma adecuada y una estabilización de la forma característica. Los componentes de la estructura solo están sometidos a **esfuerzos normales** y las características estructurales más típicas son la **catenaria** (cable en suspensión) y el **arco funicular**. Debido a que estos sistemas pueden soportarse a sí mismos gracias a su forma son los más idóneos para cubrir grandes vanos.



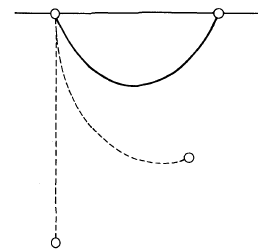
Fig. 35\_ Puente colgante de Capilano, 1889, Vancouver



Fig. 36\_ Robert Maillart  
Puente de Salginatobel, 1930, Suiza

Los predecesores de los sistemas estructurales de forma activa son el **cable vertical** en suspensión, que transmite la carga directamente al punto de suspensión, y la **columna vertical**, que, en la dirección inversa, transfiere la carga directa al punto base. Son prototipos de estos sistemas estructurales: transmiten cargas solo a través de sistemas simples de tensiones normales, es decir, a través de compresión y tracción.

Fig. 37\_ Cable en suspensión



Dos cables con diferentes puntos de suspensión conectados entre sí, forman un sistema en suspensión que puede soportar su propio peso y transfiere las cargas por esfuerzos laterales simples. Del mismo modo, si un cable en suspensión se invierte, transformando los esfuerzos de tracción en compresión, da como resultado un arco funicular.

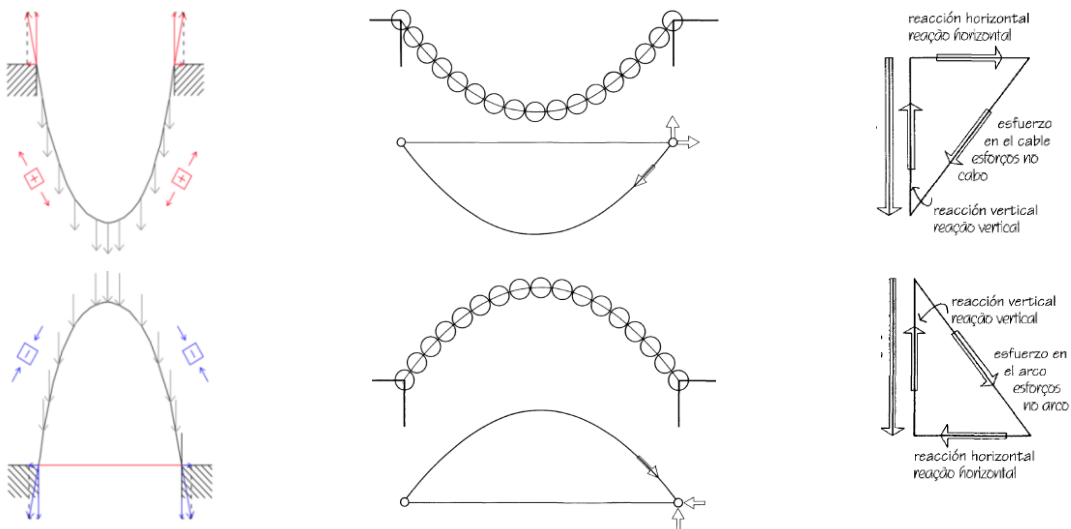


Fig. 38\_ Diagramas de tracción y compresión. Cable en suspensión y arco funicular. Descomposición de los esfuerzos en reacciones



Por lo tanto, la característica estructural del sistema de formas activas es, por lo tanto, desviar las fuerzas externas por las fuerzas axiales de tracción del cable y de compresión del arco, dando como resultado **formas funiculares**.

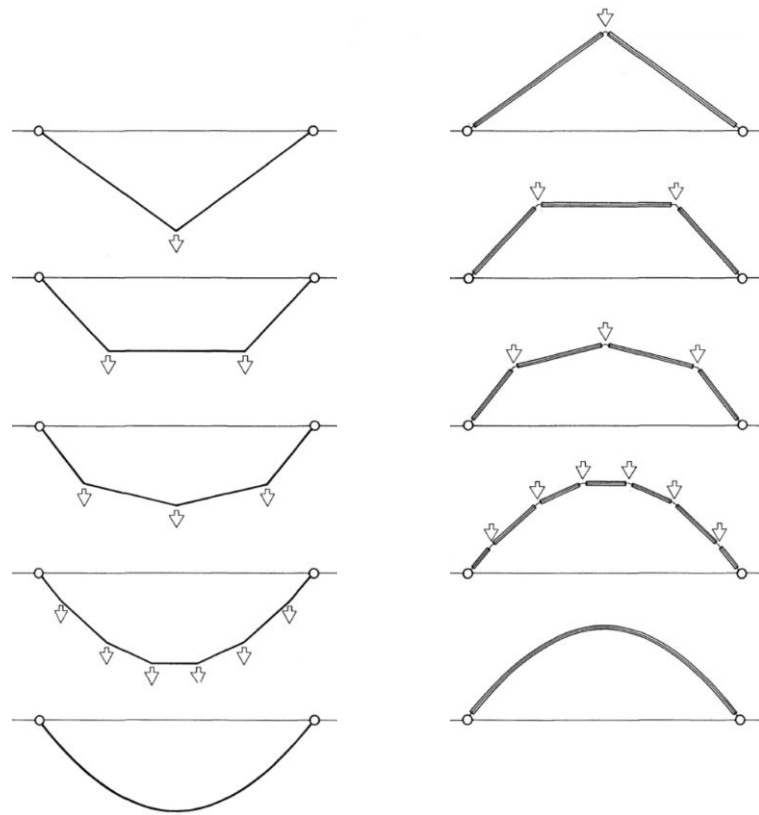


Fig. 39\_ Diagrama de un cable suspendido y un arco funicular sometido a varias cargas puntuales y a una carga distribuida.

El mayor problema de estos sistemas se encuentra en sus extremos debido a las fuerzas horizontales que se generan en estos puntos. El **mecanismo de apoyo** debe garantizar la desviación del flujo de fuerzas en estos puntos, debe presentar una forma tal que contenga el camino natural del flujo de esfuerzos.



Fig. 40\_ Posibles mecanismos de apoyo para transferir los flujos de fuerza de la estructura al terreno.

Además, cualquier **variación de carga o de las condiciones de apoyo** afecta a la distribución de las fuerzas axiales y, por lo tanto, a la forma funicular del cable o del arco, dando como resultado una **nueva forma estructural**. Bajo un nuevo sistema de cargas, mientras que el cable en suspensión, como “sistema elástico”, asume por sí mismo una nueva transmisión de esfuerzos, el arco, como “sistema inelástico”, debe compensar el flujo de fuerzas a través de la flexión. Es decir, un cable en suspensión, bajo diferentes cargas cambia su forma dando como resultado una nueva forma funicular; sin embargo, el arco, que no puede variar su forma, puede ser funicular solo en una cierta condición de carga.

Pero no todo son puntos positivos las razones por las que elegir un sistema de forma activa. Es cierto que, como se ha explicado, un sistema de cables puede cubrir un espacio ajustando su forma a la distribución de los esfuerzos, pero no podemos olvidar que esto es debido a que el cable no puede absorber flexiones ya que no presenta rigidez ante las cargas. Por lo tanto, debido a su escaso peso propio en la relación a la luz y a su flexibilidad, es muy sensible a la succión del viento, las vibraciones y las cargas asimétricas y dinámicas. Para evitar estas acciones será necesaria una **estabilización del sistema** de cables en suspensión.

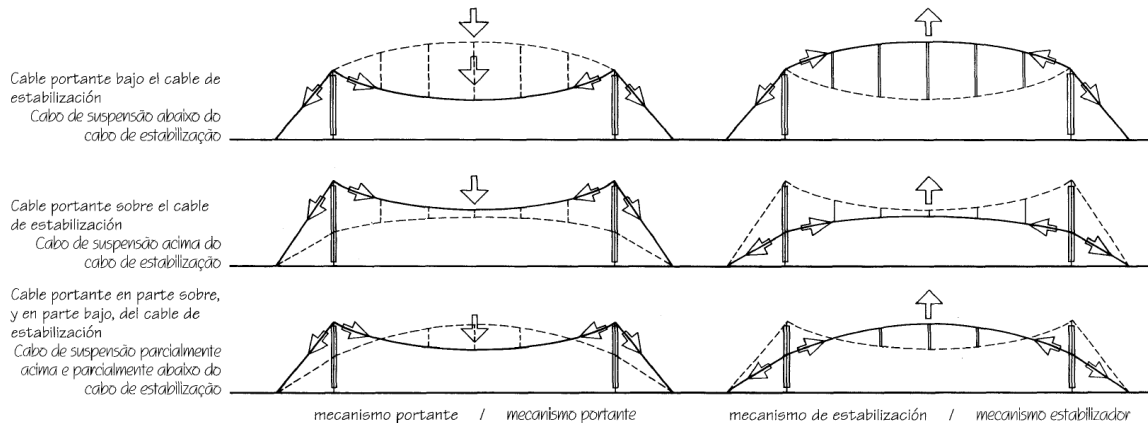


Fig. 41\_ Diferentes sistemas de estabilización

La estabilización del sistema de cables en suspensión puede realizarse a través de varias soluciones, como son: el **aumento del peso propio**, su **rigidización** mediante la construcción de un arco invertido (o de una membrana), el **arriostramiento** con un cable de curvatura opuesta o el arriostramiento con cables transversales anclados al suelo. Estas son algunas de las soluciones empleadas en nuestros edificios caso de estudio: tanto en el Pabellón de Portugal como en el Estadio de Braga se opta por un aumento del peso propio de los cables mediante la lámina de hormigón de la cubierta, ya sea total o parcialmente; por otro lado, en el caso de la Estación de Servicio de Yarza se combinan los cables principales con otros secundarios que arriostran el conjunto.

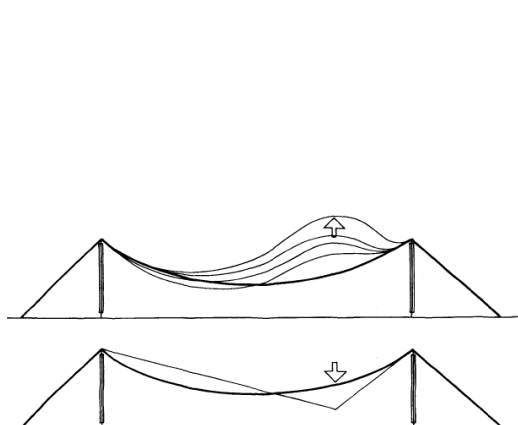


Fig. 42\_ Diagrama que muestra la inestabilidad frente a la acción del viento o de una carga puntual en una cubierta en suspensión.

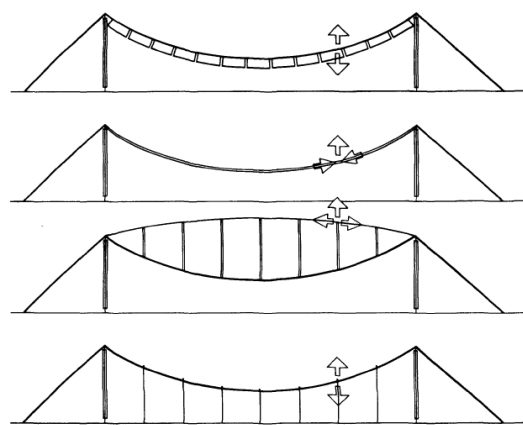


Fig. 43\_ Diferentes mecanismos de estabilización de cubiertas en suspensión.

Por otro lado, se debe **asegurar la estabilidad total** de la estructura, no solamente del sistema de la cubierta. Esto depende del modo en que se decida llevar las cargas de la cubierta al suelo: mediante un cable tensor, a través de una lámina resistente a flexión, haciendo uso de una viga horizontal,... Es aquí donde se puede hacer uso de otros sistemas de estructuras para controlar los flujos de fuerzas: pilar recto con cable oblicuo o viceversa (sistema de forma activa), pilar de celosía (sistema de vector activo), pilar empotrado o pórtico resistente a flexión (sistema de sección activa), contrafuerte (sistema de superficie activa). De este modo, se obtiene como resultado estructuras muy interesantes tanto desde el punto de vista estructural como arquitectónico.

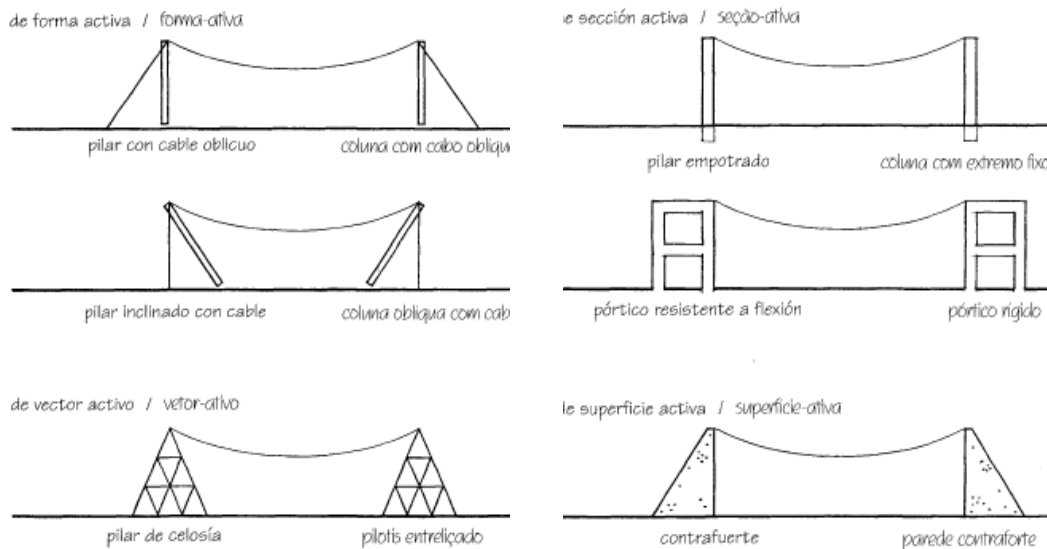


Fig. 44\_ Diferentes mecanismos para asegurar la estabilidad total de la estructura

Así pues, los sistemas de forma activa, debido a su dependencia de las condiciones de carga, están **estrictamente influenciados por la disciplina del flujo natural de las fuerzas** y, por lo tanto, no pueden ser objeto de diseño arbitrario y gratuito. La forma y el espacio arquitectónico son el resultado del mecanismo de flexión.

Como ya se ha explicado, debido a su identificación con el flujo natural de las fuerzas, los sistemas de forma activa son los mecanismos más convenientes para cubrir grandes luces y formar grandes espacios. Así pues, previamente, presentaremos el método de los elementos finitos para, a continuación, aplicarlo sobre nuestras tres cubiertas elegidas. De este modo, comprobaremos si son ejemplos de estructuras sinceras como era el problema que se planteaba en este tipo de arquitecturas donde, como se dijo, hacen de la estructura su mayor virtud.

## 5\_ EL MEF. FUNDAMENTOS

### \_ ¿Qué es el Método de los Elementos Finitos?

El método de los elementos finitos es un método numérico general para la **aproximación** de soluciones de **ecuaciones diferenciales parciales** asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. Es decir, da soluciones aproximadas a ecuaciones diferenciales de cierto grado de complejidad con una precisión lo suficientemente alta como para asegurar la fiabilidad de los resultados. Debido a la cantidad de información que se debe procesar, el MEF está pensado para ser usado en **ordenadores**.

La principal diferencia entre los métodos clásicos y los elementos finitos es la forma de ver la estructura. Los métodos clásicos consideran la estructura como un continuo. El MEF considera la estructura como un ensamble de un número finito de partículas pequeñas.

El uso de métodos clásicos es probablemente la mejor manera de analizar estructuras simples. Cuando el sistema es complejo, resulta mucho más eficaz el uso del MEF.

### \_ ¿Cómo trabaja el MEF en la práctica?

El MEF convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema matricial que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente una solución aproximada. Esta aproximación se lleva a cabo haciendo uso de las llamadas **funciones de forma**. Los puntos donde la solución es exacta se denominan **nodos**. Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada **mall**a, formada por retículos. Cada uno de estos retículos contenidos en dicha malla es un **“elemento finito”**. El conjunto de nodos se obtiene dividiendo o discretizando (mallando) la estructura en elementos de forma variada; pueden ser barras (elementos 1D), superficies (elementos 2D) y volúmenes (elementos 3D).

El MEF, por lo tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto de elementos finitos. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo, de cada elemento finito, se obtiene mediante interpolación de los valores conocidos en los nodos mediante el uso de las funciones de forma.

Desde el punto de vista de la programación algorítmica, las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se divide en:

**Preproceso.** Se prepara el modelo para el cálculo. Consiste en la definición de la geometría, generar la malla, establecer las condiciones de contorno y asignar las propiedades de los materiales. Es un paso que requiere decisiones realizadas por el usuario del programa.

**Cálculo.** Realiza todo el cálculo del MEF. El programa transfiere las cargas al modelo, genera las matrices de rigidez, resuelve el sistema de ecuaciones y genera la solución.

**Postproceso.** Representación gráfica de los resultados.

Actualmente, existen múltiples programas informáticos para elementos finitos. Entre ellos se encuentran ABAQUS, ANSYS e I-DEAS. Para nuestro trabajo haremos uso de éste último.

### \_ ¿Cómo funciona el método?

Dado un sólido, sometido a un sistema de cargas y coaccionado por unas reacciones externas, el método consiste en subdividir el sólido en pequeñas partes (elementos) interconectadas entre sí a través de sus nodos, de manera que, suponemos, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nodos (**desplazamientos nodales**). Posteriormente, se podrá determinar la **matriz de rigidez** de cada elemento, las cuales una vez ensambladas (matriz de rigidez del sólido completo), permitirá la obtención de los desplazamientos en los nudos de cada elemento. De esta manera, una vez conocidos dichos desplazamientos, podremos determinar, de una forma aproximada, las **tensiones** y las **deformaciones** en el interior del elemento.

Veamos, brevemente, las expresiones que intervienen en este proceso del MEF.

Un elemento finito viene definido por sus nodos ( $i, j, m$ ) y por su contorno formado por líneas que los unen. Según la geometría del elemento tendremos un tipo u otro de elemento finito (barra, superficie o volumen).

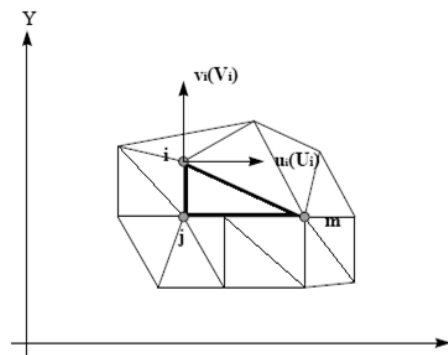


Fig. 45\_ Elemento finito en el plano XY definido por sus nodos ( $i, j, m$ )

Conocidos sus nodos, podemos definir los **desplazamientos  $u$**  de cualquier punto del elemento gracias a las funciones de forma  $N$ , que permiten recorrer el elemento de forma aproximada en todo su conjunto.

$$u = N \cdot a$$

$u$ , vector desplazamientos de cualquier punto del elemento

$N$ , vector función de posición (definido por funciones de forma)

$a$ , vector coordenadas de los nodos ( $i, j, m$ ) del elemento

Del mismo modo, conocidos los desplazamientos, podemos determinar las **deformaciones  $\epsilon$**  en cualquier punto. Y si, además, conocemos las propiedades del material, podemos obtener las **tensiones  $\sigma$**  a las que está sometido del elemento.

$$\varepsilon = S \cdot u$$

$\varepsilon$ , vector deformaciones

$S$ , operador lineal adecuado

$u$ , vector desplazamientos de cualquier punto del elemento

$$\sigma = D \cdot \varepsilon$$

$\sigma$ , vector tensiones

$D$ , matriz de elasticidad que contiene las propiedades del material

$\varepsilon$ , vector deformaciones

Las **fuerzas**  $q$  que actúan sobre los nodos son estáticamente equivalentes a las tensiones  $\sigma$  en el contorno y a las fuerzas distribuidas  $b$  que actúan sobre el elemento. Es decir,

$$q = \int B \cdot \sigma \, dV - \int N \cdot b \, dV$$

$q$ , vector fuerza en los nodos del elemento

$B$ , matriz funciones de forma de las tensiones

$\sigma$ , vector tensiones

$N$ , matriz funciones de forma de las fuerzas distribuidas

$b$ , vector fuerzas distribuidas

Esta expresión es válida con **carácter general** cualesquiera sean las relaciones entre tensiones y deformaciones (la relación entre las fuerzas nodales y tensiones en el contorno y fuerzas distribuidas se determina por medio del método de los trabajos virtuales). En otras palabras, esta expresión recorre todo el elemento para conocer las tensiones internas del elemento y las fuerzas exteriores a las que está sometido para conocer su valor en los nodos.

Si las tensiones siguen una ley lineal, es decir, no necesitamos integrar para conocer el valor en cada punto, la ecuación se simplifica de la forma siguiente,

$$q = K \cdot a + f$$

$q$ , vector fuerza en los nodos del elemento

$K$ , matriz de rigidez del elemento

$a$ , vector coordenadas de los nodos  $(i, j, m)$  del elemento

$f$ , vector fuerzas exteriores

De este modo, podemos conocer las fuerzas a las que está sometido el elemento. La matriz de rigidez nos permite caracterizar al elemento conocidos su área, inercia, módulo de Young y longitud.

## **\_Funciones de forma**

La **interpolación** es un elemento clave del MEF, puesto que a través de las funciones de forma se consigue reducir el problema a la determinación de los corrimientos de unos nodos. Estas

funciones deben dar valores suficientemente aproximados al recorrer cualquier punto del elemento.

Es conveniente que las funciones de forma tengan la propiedad de valer la unidad en los nodos a los que están asociados y que tengan valor nulo en el resto. De este modo, se asegura la continuidad entre elementos.

Con el fin de conseguir un mayor ajuste de los elementos a la geometría del cuerpo, existe también una interpolación de tipo geométrico. Esto permite obtener elementos de lados curvos a partir de un elemento de referencia.

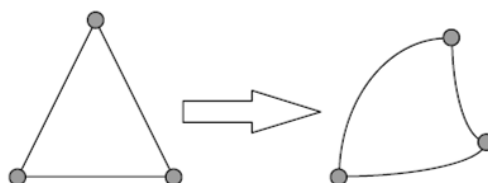


Fig. 46\_ Elemento finito de tres nodos. Interpolación geométrica

No solo pueden distorsionarse elementos bidimensionales en otros bidimensionales, sino que también se puede distorsionar elementos bidimensionales en elementos tridimensionales. Para ello, ha de establecerse una correspondencia tal que las funciones de forma empleadas aseguren la obtención de lados curvos sin pliegues para que las transformaciones sean unívocas, es decir, que a cada punto del sistema cartesiano le corresponda un único punto del sistema curvilíneo y viceversa.

### **\_Tipos de elementos finitos**

Dependiendo de la dimensión, los elementos básicos se pueden dividir en tres categorías: línea (1D), área (2D) y volumen (3D). Dentro de estas tres categorías, para nuestro trabajo se ha hecho uso de los elementos *beam*, *shell* y *solid*, respectivamente.

La selección del tipo de elementos depende tanto de la complejidad que se le quiere dar a la malla como del tipo de resultados esperados. Es decir, por un lado, podemos mallar nuestra estructura teniendo en cuenta de antemano los problemas al pasar de elementos tridimensionales a bidimensionales. Por otro, si nos interesa únicamente conocer un comportamiento determinado podemos hacer uso de un tipo de elemento que nos proporcione esa información obviando el resto de esfuerzos, de esta manera se simplifica el proceso de cálculo.

Los **elementos *beam*** son elementos unidimensionales que poseen seis grados de libertad por nodo, esto es, tres desplazamientos y tres giros sobre los ejes globales.

Los **elementos *shell*** son elementos bidimensionales con dos grados de libertad en cada nodo, es decir, dos desplazamientos y un giro. Como regla, se prefieren los elementos cuadriláteros a los triangulares por razones de isotropía geométrica, reservando su uso a aquellas zonas a modelizar con irregularidades.

Los **elementos solid** son elementos tridimensionales con tres grados de libertad traslacional (de desplazamiento) por nodo.

Se pueden combinar diferentes tipos de elementos en la misma modelización, siempre y cuando aseguremos la continuidad entre nodos comunes en elementos diferentes de la malla. Para ello, hay que prestar atención a los **grados de libertad** de estos nodos. Para ello, debemos aumentar o disminuir estos grados definiendo el tipo de nodo que tenemos entre estos dos elementos. Así pues, si necesitamos aumentar el grado de libertad del nodo para asegurar la continuidad de la malla lo que se suele hacer es definirlo como rótula, de este modo conseguimos dejar el giro libre.

Además, como es de esperar, para evitar discontinuidades y problemas en el cálculo, no puede haber huecos ni solapes entre los elementos de la malla.

De este modo, conociendo las dimensiones de nuestra estructura podemos modelizarla con el grado de precisión que consideremos oportuna a la hora de obtener resultados más o menos exactos según el análisis a realizar. Si necesitamos información general del comportamiento de la estructura basta con introducir una malla compuesta con pocos elementos, pero si necesitamos analizar su comportamiento de manera rigurosa necesitaremos aumentar el número de elementos y, por lo tanto, obtendremos una malla mucho más compleja.



## 6\_ CUBIERTAS DE GRANDES LUCES. CASOS DE ESTUDIO

A continuación pasaremos a describir las obras objeto de estudio y análisis de nuestro trabajo. Por un lado, explicaremos brevemente la obra a tratar desde un punto de vista más arquitectónico, destacando sus rasgos de interés y, por otro lado, se expondrá la estructura de un modo más riguroso, dando respuesta a los puntos clave del proyecto.

En primer lugar, se presenta la obra y, de manera breve, al arquitecto. Veremos aquellos puntos de interés en el edificio como pueden ser la idea de proyecto, el lugar y su relación con él y el uso de materiales. A continuación, veremos las características de la estructura en relación de su geometría.

Pasando a la parte más técnica, se explica de manera breve cómo se han usado los diferentes tipos de elementos a la hora de realizar los modelos de elementos finitos utilizados para el cálculo de nuestros edificios, señalando aspectos tan importantes como son las características de los materiales, las condiciones de apoyo y las cargas que actuarán sobre la estructura, así como las hipótesis consideradas.

Una vez detallado el método seguido para definir nuestros modelos de cálculo, se presentan los resultados obtenidos para cada edificio, centrándonos en las tensiones de las cubiertas (axiles y valor de von mises de los cables) y en las tensiones del hormigón de los contrafuertes (valores máximos y mínimos). Con estos valores seremos capaces de explicar de manera objetiva el funcionamiento estructural y ver cómo influyen en las decisiones formales: relacionar dimensionado estructural y diseño arquitectónico. O, lo que es lo mismo, explicar la sinceridad estructural de cada edificio.

La comprobación de la estructura se ajusta en todos sus apartados a las especificaciones del **Código Técnico de la Edificación**, en vigor, y en concreto a los documentos siguientes:

- Eurocódigo 1: Bases de Proyecto y Acciones en Estructuras
- Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero
- EHE 08, Instrucción Española del Hormigón Estructural

## \_ Pabellón De Portugal, Álvaro Siza

Fig. 47\_ Pabellón de Portugal, Álvaro Siza



El Pabellón de Portugal (1995-97) de la Expo98 realizada en Lisboa es obra de **Álvaro Siza**. El pabellón fue clasificado como Monumento de Interés Público por el Instituto Portugués de Patrimonio Arquitectónico en marzo de 2010.

Álvaro Siza (Portugal, 1933) es un arquitecto portugués de reconocido prestigio. Obtuvo el título de arquitecto en la Facultad de Bellas Artes de la Universidad de Oporto en 1966. Además del ejercicio profesional, ha sido profesor en varias universidades. Cuenta con numerosos premios, entre ellos, en 1988 recibió el Premio Alvar Aalto y el Premio de Arquitectura Contemporánea Mies van der Rohe, en 1992 el Premio Pritzker de Arquitectura, y fue nombrado Doctor honoris causa por la Universidad de Sevilla en 2011 y por la Universidad de Granada en 2014. Algunas de sus obras más conocidas son las Piscinas Leça de Palmeira, Centro Galego de Arte Contemporánea, la Iglesia de Marco de Canaveses y el Pabellón de Portugal.

Fig. 48\_ Interior del Pabellón



El Pabellón de Portugal se encuentra dentro del **recinto de la Expo** dispuesto en la esquina noroeste del nuevo muelle sobre el río Tajo. La Expo no solo pretendía recuperar esta área de la ciudad, sino también desarrollarla y darle dinamismo, por lo que se pensó darle utilidad a toda esta infraestructura una vez finalizase la exposición. Varias han sido las propuestas para su uso, desde Sede del Consejo del Ministerio hasta la creación de un Museo de Arquitectura. Actualmente, se mantiene un programa provisorio de exposiciones.

El edificio supone una imagen emblemática para la ciudad y destaca por su sencillez y contundencia. La **gran pérgola curva en forma de catenaria** representa las velas de los barcos portugueses y la luz que penetra en ese gran espacio se comporta como una gran ventana al mar. Como guiño a la tradición del lugar los contrafuertes laterales de hormigón se recubren haciendo uso del azulejo, material muy típico en la arquitectura portuguesa, aportando color y brillo al conjunto.

Fig. 49\_ Alzado lateral del Pabellón



### Características de la estructura

El hormigón es el material principal del proyecto y la estructura. La pérgola del espacio cubierto se trata de una losa de 65m por **58m de luz** que define una **curva catenaria** con altura mínima de 10m, tiene unos **20cm de espesor** y se encuentra suspendida a 14m por unos cables de acero de unos 10mm que actúan de armadura. Estos cables están anclados a los bloques laterales de hormigón armado de 1m de espesor, 16m de altura y 8.10m de longitud que actúan como contrafuertes. Sobre estos se dispone una viga de relinga (viga a la cual se anclan los cables de cubierta) de 40cm de espesor.

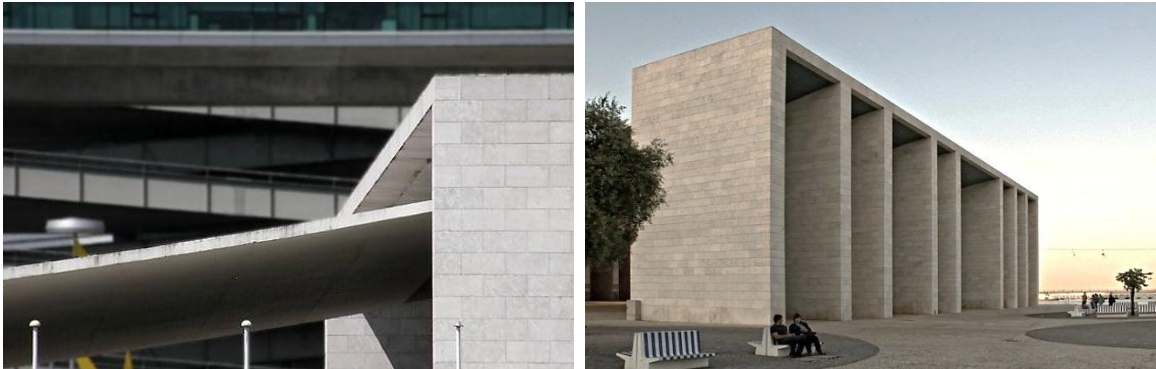


Fig. 50, 51 y 52\_ Diferentes imágenes de la lámina de cubierta y los contrafuertes

Realmente el elemento estructural que cubre el espacio son los **cables de acero**, la lámina de hormigón únicamente garantiza la estabilidad de los mismos. Por ello, el arquitecto puede jugar con la losa de hormigón y no cubrir el espacio en su totalidad, permitiendo la entrada de luz en el encuentro de la cubierta con los contrafuertes laterales, lo que genera una zona de apertura y provoca ingravidez a la cubierta.

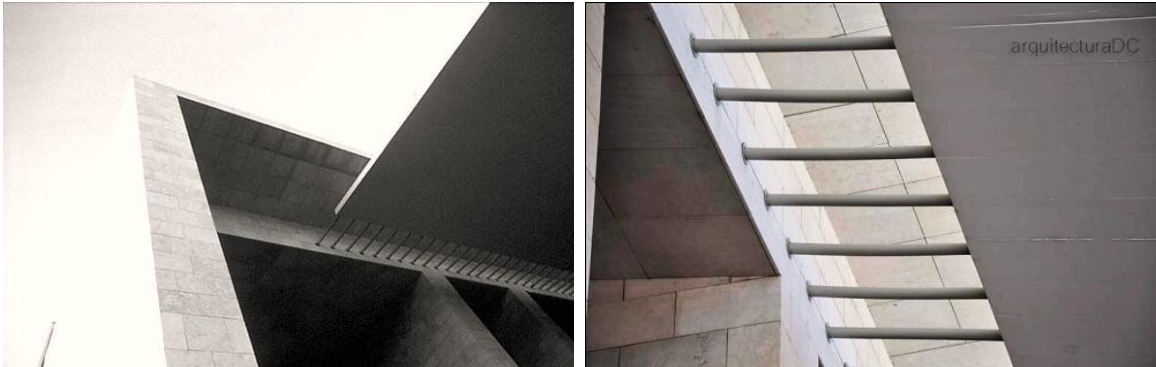


Fig. 53, 54 y 55\_ Encuentro de la lámina de cubierta y los contrafuertes



## \_ Estadio De Braga, Eduardo Souto De Moura

Fig. 56\_ Estadio de Braga, Eduardo Souto de Moura



El Estadio Municipal de Braga (2003) es obra del arquitecto portugués **Eduardo Souto de Moura**. Fue construido como una de las sedes de la Eurocopa de 2004. De los siete nuevos estadios que Portugal construyó para la ocasión, el de Braga ha sido calificado como el más espectacular. Con este proyecto el arquitecto ganó el 2005 el Premio FAD de Arquitectura.

Eduardo Souto de Moura (Portugal, 1952) es un arquitecto portugués cuyo trabajo destaca por el rigor y la precisión de las formas, así como por una profunda sensibilidad hacia el contexto. Se licenció en Arquitectura en la Escuela Superior de Bellas Artes de Oporto en 1980. Además del ejercicio profesional, ha sido profesor en varias universidades. Cuenta con numerosos premios, entre ellos, fue galardonado con el Premio Pritzker de Arquitectura en 2011 y con el Premio Wolf de las Artes en 2013. Algunas de sus obras más conocidas son la Casa das Histórias Paula Rego, la Casa en Moledo y el Estadio de Braga.

El Estadio de Braga se sitúa dentro del **Parque Deportivo de Dume**, en la costa norte de Monte Castro, una de las zonas con más desnivel de la ciudad. El lugar se escogió para evitar hacer un muro de contención en las orillas del valle. De este modo, la obra se apoya en la ladera norte del monte.



Fig. 57 y 58\_ Imagen previa a la actuación y situación actual de la zona con el Estadio

**Naturalizar la arquitectura y artificializar el entorno** son el mismo procedimiento, de este modo, la obra forma un todo con el paisaje que le rodea. La estructura suspendida da ligereza al complejo de hormigón armado y por la noche parece llegar a disolverse, dejando entrever el cielo y la montaña.



Fig. 59 y 60\_ Encuentro del Estadio con la ladera. Visión nocturna del conjunto

El estadio fue construido con gradas únicamente en los laterales del terreno de juego. La estructura de hormigón armado define con líneas sobrias las dos tribunas. A un lado, tres galerías circulares atraviesan el graderío permite atravesarlo fácilmente y, al otro, una gran galería de respeto con el terreno realiza esta función. La ausencia de tribunas en los otros dos lados hace que el estadio esté más abierto hacia el exterior con respecto a las estructuras análogas, por lo que permite un **intercambio visual con el paisaje**. De este modo, uno de los fondos queda cerrado visualmente con la cantera en forma de anfiteatro y el fondo contrario es un espacio abierto con una vista panorámica de la ciudad. Cada grada lateral se cubre con una cubierta y ambas están conectadas entre sí a través de cables de acero.



Fig. 61, 62, 63 y 64\_ Galerías circulares del graderío exterior y galerías junto al terreno del graderío opuesto. Imagen del conjunto



## Características de la estructura

La estructura se resuelve mediante contrafuertes de hormigón armado y **cables suspendidos** de acero para la cubierta de **160m de luz**. Los contrafuertes de hormigón de unos 40m de altura tienen 1m de espesor y están separados 6m entre sí. Su sección lateral, vista en alzado, varía desde los 38m de longitud en su base hasta los 8.3m que tiene en la parte superior. Los contrafuertes que componen la grada sur se adosan al acantilado de la cantera y los que componen la grada norte quedan empotrados en su base al terreno.

Ambas gradas están cubiertas y unidas entre sí por un sistema de cables de acero de unos 10cm. Estos cables en suspensión están empotrados a los contrafuertes de hormigón armado en su parte superior a una viga de relinga (viga a la cual se anclan los cables de cubierta) de 80cm de espesor. A estos cables se anclan unos paneles ligeros de cubierta y en su extremo se encuentra una viga en celosía que recoge tanto los sistemas de pluviales como de iluminación.



Fig. 65\_ Visión de uno de los graderíos desde el campo de juego

## \_ Estación De Servicio “Los Enlaces”, José De Yarza



Fig. 66\_ Estación de Servicio “Los Enlaces”, José de Yarza

La Estación de Servicio “Los Enlaces” (1961-62) es obra del arquitecto **José de Yarza García**. Es una de las mejores muestras de arquitectura contemporánea de Zaragoza por lo que fue declarada como Bien Catalogado del Patrimonio Cultural Aragonés en febrero de 2008.

José de Yarza García (Zaragoza, 1907) es un arquitecto aragonés perteneciente a una familia de arquitectos ininterrumpida hasta hoy. Es hijo de José de Yarza Echenique (1876-1920) y padre de José Miguel de Yarza con el que colabora desde 1966, fecha en que éste obtuvo el título. Yarza García estudió en Madrid donde se tituló en 1933, se trasladó a Zaragoza y desde entonces cuenta con numerosos y conocidos proyectos en la capital aragonesa. Son suyos los cines Palafox y Rex, el Hotel Goya, el Mercado de San Vicente de Paul, el Colegio de los Marianistas, la Estación de Servicio “Los Enlaces”, la Clínica Montpellier y la MAZ, así como numerosos edificios de viviendas en toda la ciudad, destacando el grupo Residencial “Salduba” como una de las mejores soluciones realizadas en Zaragoza con medios económicos reducidos.

Fig. 66\_ Estación de Servicio “Los Enlaces”, José de Yarza

El proyecto se concibe como un gran **toldo de hormigón** que genera un amplio espacio diáfano de estacionamiento abierto hacia la vía de acceso. Junto a éste, y cubierta parcialmente por el mismo, se dispone la pieza bar. Esta pieza se diferencia de cubierta gracias a dos mecanismos, la planta estrellada y el contrapunto vertical a modo de reclamo para el viajero. En nuestro caso de estudio, únicamente será analizada la cubierta.

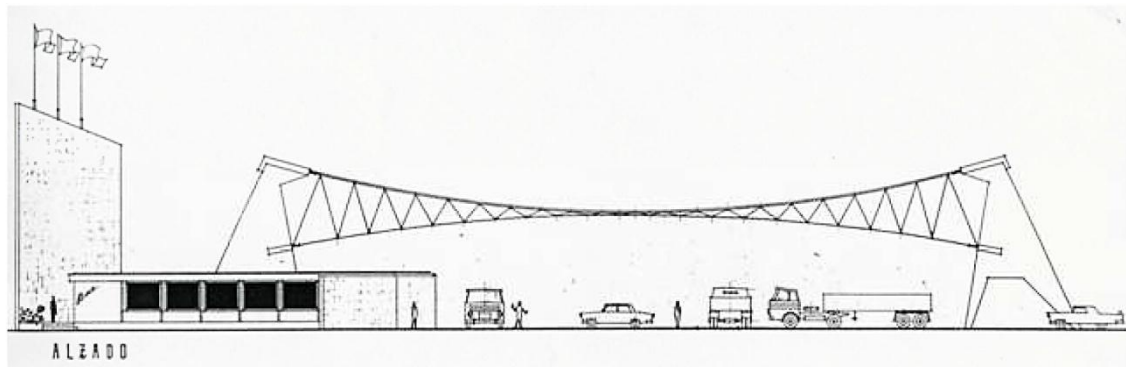


Fig. 67\_ Plano original. Alzado del conjunto





Fig. 68\_ Interior de la Estación de Servicio

La cubierta se plantea como un elemento desmontable resuelto con ligereza y brillante combinación de tecnología y diseño. Su expresión formal es el **reflejo directo del esquema estructural**, principal interés en su elección como caso de estudio. Desde el interior puede apreciarse la belleza de la cubierta colgante, la modulación y la limpieza de la solución estructural que transmite orden y claridad al espacio.

### Características de la estructura

La estructura se compone, por una parte, de ocho pórticos de hormigón armado y, por otro lado, de una parte desmontable colgada de los elementos permanentes por medio de cables de acero. Cada pórtico de hormigón armado se compone de dos elementos en forma de pajarita y se ligan entre sí mediante dos vigas también de hormigón armado desde donde se anclan los cables de cubierta. Este **conjunto de cables definen un plano catenario** cuyo cubrimiento se resuelve constructivamente con paneles de hormigón de muy poco espesor. La conjunción de la levedad de los cables tensores junto con el pequeño espesor del cubrimiento hace que la cubierta parezca una lona colgada de los pórticos de hormigón.

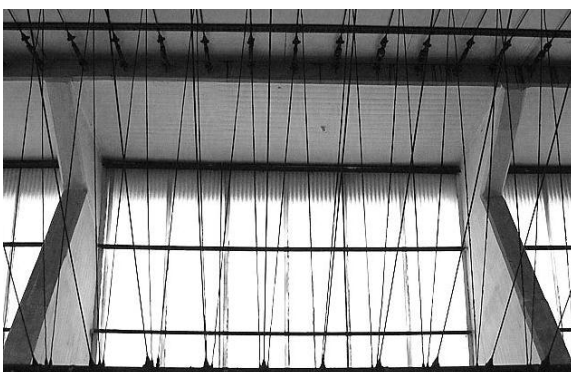


Fig. 69, 70 y 71\_ Diferentes imágenes de la cubierta y los sistemas de cables

Los pórticos de hormigón armado están separados con una modulación cada 7m y tienen 40cm de espesor. Las pajaritas que componen cada pórtico se disponen de tal manera que **la luz a cubrir es de 41m**. Su singular diseño obedece al sistema de fuerzas que este elemento estructural debe aportar (hecho que se puede comprobar tras el análisis de la estructura). Sobre estos pórticos se disponen dos vigas de relinga (vigas a las cuales se anclan los cables de cubierta). La primera viga, en la parte superior de cada pórtico, es de 40cm de espesor y la segunda, en la zona intermedia a una altura de 5m del suelo, es de 30cm. Estas vigas son las encargadas de recibir los esfuerzos provenientes de los cables principales de acero de 14.5mm de sección. Un segundo conjunto de cables también de acero de 10mm de sección atan el conjunto de cables principales otorgando estabilidad. Tanto los cables principales como los estabilizadores se anclan mediante tensores a ambas vigas garantizando la transmisión de esfuerzos. De este modo, el arquitecto teje una red de cables que recogen una cubierta ligera de hormigón terminada en chapas de aluminio.



Fig. 72\_ Interior de la Estación de Servicio

Una vez vistos los tres edificios podemos poner en común en un cuadro resumen las características principales de las tres estructuras:

	Luz (m)	Altura máxima (m)		Sec. Cables (mm)
		cables	pórticos	
Pabellón de	<b>58</b>	14	16	10
Estadio de Braga	<b>160</b>	40	40	10
Estación de Servicio	<b>41</b>	10.6	10.6	14.5

## 7\_ MODELOS DE CÁLCULO

Pasaremos ahora a explicar de manera breve cómo se han usado los diferentes tipos de elementos a la hora de realizar los modelos de elementos finitos utilizados para caracterizar el comportamiento resistente de la estructura. Además, indicaremos las características de los materiales, las condiciones de apoyo y las cargas que actuarán sobre la estructura, así como las hipótesis consideradas.

### \_ Definición del modelo geométrico. Discretización y materiales

Los tipos de elementos utilizados en el modelo han sido los denominados BEAM, SHELL y SOLID:

\_ El **elemento BEAM** se modela para representar la geometría de los cables suspendidos de la cubierta. La sección es constante en cada elemento.

\_ El **elemento SOLID** se modela para representar tanto la geometría de la cubierta de hormigón como los pórticos laterales de hormigón. Como paso previo a su modelado, es preciso el uso de elementos SHELL en 2D que, mediante su extrusión, permita llegar al elemento en 3D. Posteriormente, estos elementos serán eliminados para evitar incoherencias y nudos coincidentes interfiriendo en la continuidad de la malla.

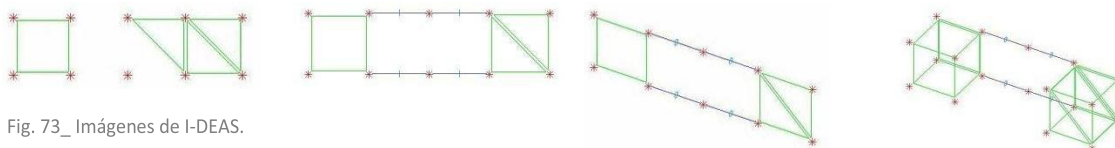


Fig. 73\_ Imágenes de I-DEAS.

a. Elementos SHELL triangulares y cuadrados (verde) creados a partir de una retícula de nodos (rojo).

b, c. Elementos BEAM (azul) que unen los elementos SHELL (verde).

d. Elementos SOLID (verde) tras la extrusión de los elementos SHELL (verde).

El **acero** de los cables se ha definido como un material con comportamiento elástico con un módulo de Young de 210 000MPa y un coeficiente de Poisson de 0.29. Su densidad es de 7.85T/m<sup>3</sup>. El límite elástico del acero es 261MPa y el límite de rotura es 344MPa. Considerando un coeficiente de seguridad para el acero de 1.05 se considera como límite elástico de cálculo 249MPa.

El **hormigón armado** de los pórticos se ha definido como un material con comportamiento elástico con un módulo Young de 28 500MPa y un coeficiente de Poisson de 0.3. Su densidad media es de 2.4T/m<sup>3</sup>. El límite elástico del hormigón es de 30MPa y el límite de rotura es 42.5MPa. Considerando un coeficiente de seguridad para el hormigón armado de 1.15 se considera como límite elástico de cálculo 26MPa.

### \_ Condiciones de apoyo y cargas exteriores. Hipótesis

Para llevar a cabo las comprobaciones estructurales, se contemplan los siguientes casos individuales de carga:

- Peso propio de la estructura
- Nieve
- Acción del viento: Lateral (VI+X), Frontal (VI+Y) y Dorsal (VI-Y)

El **peso propio** se ha evaluado a partir de la densidad del acero ( $7.850 \text{ T/m}^3$ ) y del hormigón ( $2.4 \text{ T/m}^3$ ). Para el **viento**, se ha considerado una presión dinámica de  $75 \text{ Kp/m}^2$  ( $125 \text{ km/hora}$ ), con los coeficientes eólicos correspondientes (+1.2 en el caso de viento frontal y -1.8 en el caso de viento dorsal). La distribución de coeficientes eólicos para el viento se ha considerado según el Eurocódigo 1.

Se han realizado las siguientes **combinaciones de carga** (ELU):

Hipótesis	PP	PR	NI	VI+X	VI+Y	VI-Y
I	1.35	1.35				
II	1.35	1.35	1.50			
III	0.80	0.80		1.50		
IV	0.80	0.80			1.50	
V	0.80	0.80				1.50
VI	1.35	1.35	1.50	0.90		
VII	1.35	1.35	1.50		0.90	
VIII	1.35	1.35	1.50			0.90
IX	1.35	1.35	0.75	1.50		
X	1.35	1.35	0.75		1.50	
XI	1.35	1.35	0.75			1.50

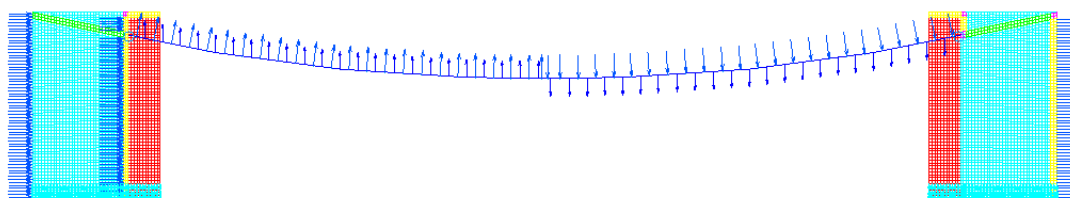
Las cargas se han introducido como **cargas distribuidas**, según el caso. Las cargas de peso propio se han definido mediante la aceleración de la gravedad ( $9.806 \text{ m/s}^2$ ). La carga de nieve se ha introducido en el modelo como cargas distribuidas por unidad de superficie o como carga distribuida por unidad longitud según el modelo a considerar.

Por lo que se refiere a las **condiciones de apoyo**, se ha considerado empotramiento en los nudos inferiores de los pórticos de hormigón. En cuanto a las **uniones** entre los pórticos de hormigón y los cables de acero se han considerado uniones mediante rótulas para simular la solución constructiva habitual.

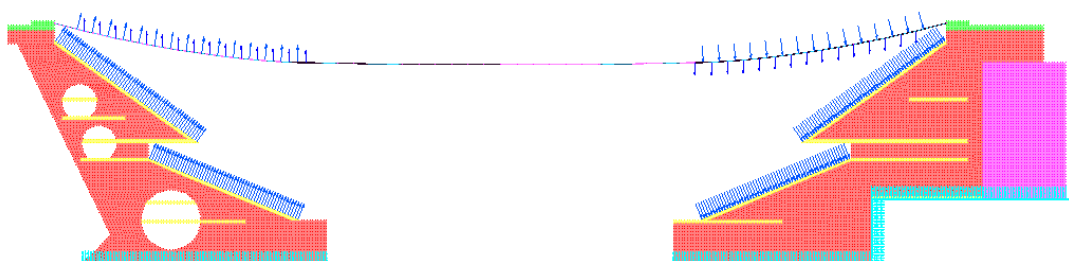
## \_ Modelos de cálculo

De este modo quedan definidos nuestros tres modelos de los edificios con condiciones de contorno (acciones externas y apoyos):

Pabellón de Portugal:



Estadio de Braga:



Estación de Servicio “Los Enlaces”:

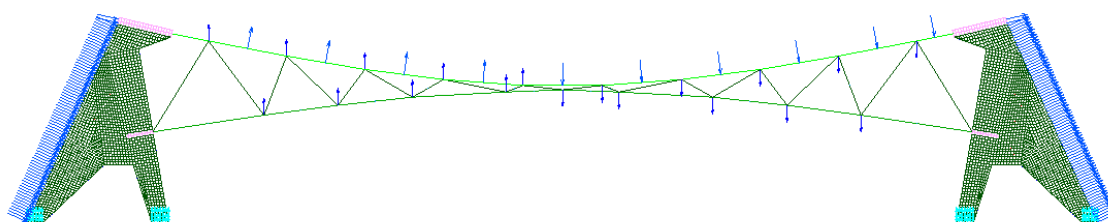


Fig. 74, 75 y 76\_ Imágenes de los modelos realizados en I-DEAS

Podemos identificar en los modelos donde se encuentran los empotramientos de los contrafuertes de hormigón con el terreno (flechas azul cian), donde actúan las presiones de viento (flechas azul marino) y las cargas del peso propio de la cubierta (flechas azul oscuro).

En el **anexo** se puede consultar la información relativa a la geometría de cada uno de los edificios, así como imágenes del proceso llevado a cabo en i-DEAS para modelarlos.

## 8\_ ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Antes de pasar a ver los resultados obtenidos, comentar que se ha realizado la comprobación de estas estructuras mediante **análisis dinámicos** (también llamados modos propios). Este tipo de análisis se basan en sistemas no lineales (no simplificados) y son muy utilizados para el estudio de pequeñas oscilaciones o vibraciones que pueda sufrir una estructura alrededor de su posición de equilibrio. El análisis dinámico es muy importante porque ese movimiento oscilatorio produce una modificación de las tensiones y deformaciones existentes. Como resultado de una perturbación exterior un edificio, que bajo la acción de unas cargas estaba en reposo, puede presentar un movimiento armónico compuesto, es decir, puede comenzar a vibrar hasta entrar en resonancia, lo que puede acabar colapsando la estructura. Muchos son los casos de puentes colgantes que han colapsado debido a la falta de este análisis, como son los casos del puente de Tacoma Narrows (fig. 77) o, el más actual, el Puente del Milenio de Londres (fig. 78). Tras efectuar esta comprobación en nuestras tres cubiertas, los resultados son tan lógicos que no aportan información relevante a destacar para nuestro trabajo.



Fig. 77\_ Leon Moisseiff  
Puente Tacoma Narrows, 1940, EE. UU.



Fig. 78\_ Norman Foster  
Puente del Milenio, 2000, Londres

En primer lugar, comentaremos los valores referidos a los cables de acero y la cubierta y, en segundo lugar, veremos los resultados obtenidos para los pórticos de hormigón de los tres edificios.

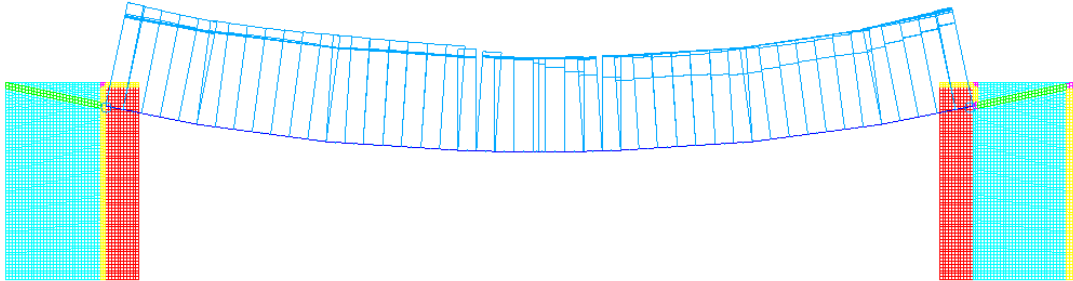
### \_ Esfuerzos en los cables de acero. Valores de tracción y von mises

Así pues, para analizar la cubierta nos interesa conocer los valores referidos a las tensiones de los cables ya que, como se explicó anteriormente, las **formas catenarias** resisten esfuerzos simples de tracción y de compresión. Como sabemos los esfuerzos axiales están relacionados con las tensiones y la sección sobre la que actúan, es decir,  $N = \sigma / A$ . Por lo que si para unas tensiones  $\sigma$  dadas aumentamos la sección cable, los esfuerzos son menores, y viceversa.

En las siguientes imágenes podemos ver los valores de los esfuerzos para las diferentes cubiertas. Estos serán mayores o menores según la luz que salvan, las cargas y la sección del cable.

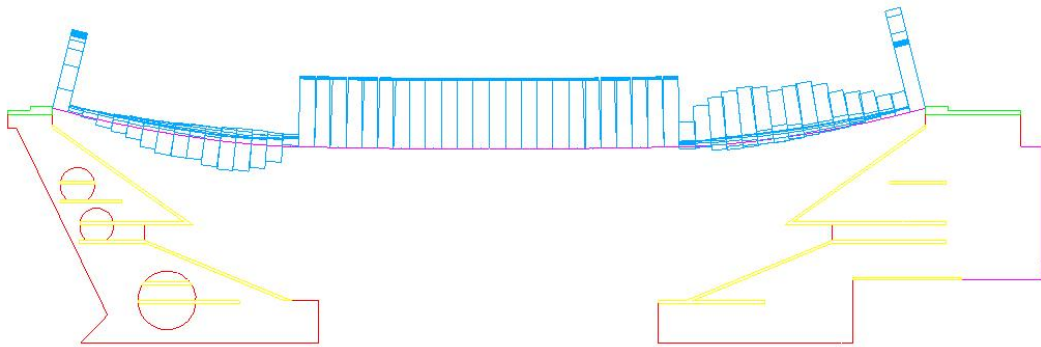
Pabellón de Portugal:  $\sigma_{\text{máx}} = 49860860 \text{ N/m}^2$

Data component: AXIAL STRESS at maximum point  
Maximum amplitude = 49860860.0



Estadio de Braga:  $\sigma_{\text{máx}} = 53263058 \text{ N/m}^2$

Data component: AXIAL STRESS at maximum point  
Maximum amplitude = 53263058



Estación de Servicio “Los Enlaces”:  $\sigma_{\text{máx}} = 92527437 \text{ N/m}^2$

Data component: AXIAL STRESS at maximum point  
Maximum amplitude = 92527437

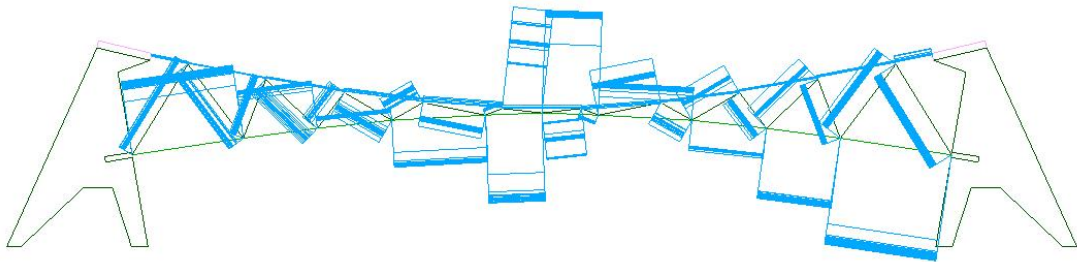
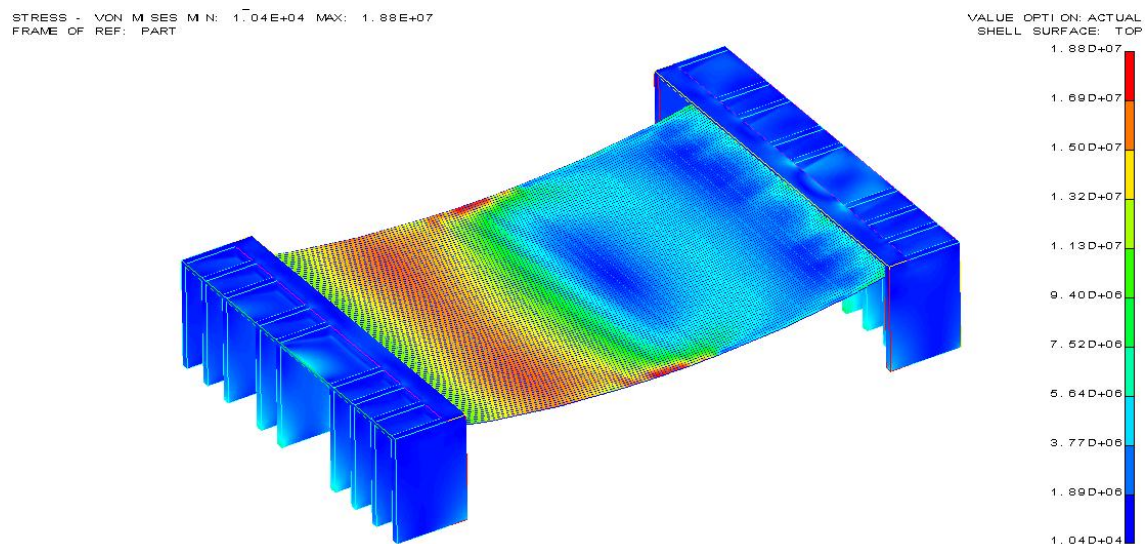


Fig. 79, 80 y 81\_ Imágenes de los modelos realizados en I-DEAS



Visto así, podemos dimensionar los cables (o, lo que es lo mismo, nuestras cubiertas) como mejor convenga a nuestro diseño con total libertad. No es así. Disponemos de otro valor a tener en cuenta a la hora de asegurar el comportamiento resistente del conjunto: **la tensión de von mises**. Esta magnitud física es un escalar que, en ingeniería estructural, se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles. Es decir, la tensión de von mises puede definirse como el lugar geométrico de los puntos donde la tensión es admisible para una sección dada. Cuando dicha tensión supera cierto valor debemos buscar otra sección (modificar el diseño) hasta que el von mises sea admisible. En las siguientes imágenes podemos ver los valores de los von mises obtenidos para las diferentes cubiertas. Los puntos donde la cubierta esté más solicitada o esté bajo la acción del viento veremos cambios en este parámetro.

Pabellón de Portugal:  $\sigma_{VM} = 1.88 \times 10^7 \text{ N/m}^2$



Estadio de Braga:  $\sigma_{VM} = 4.45 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

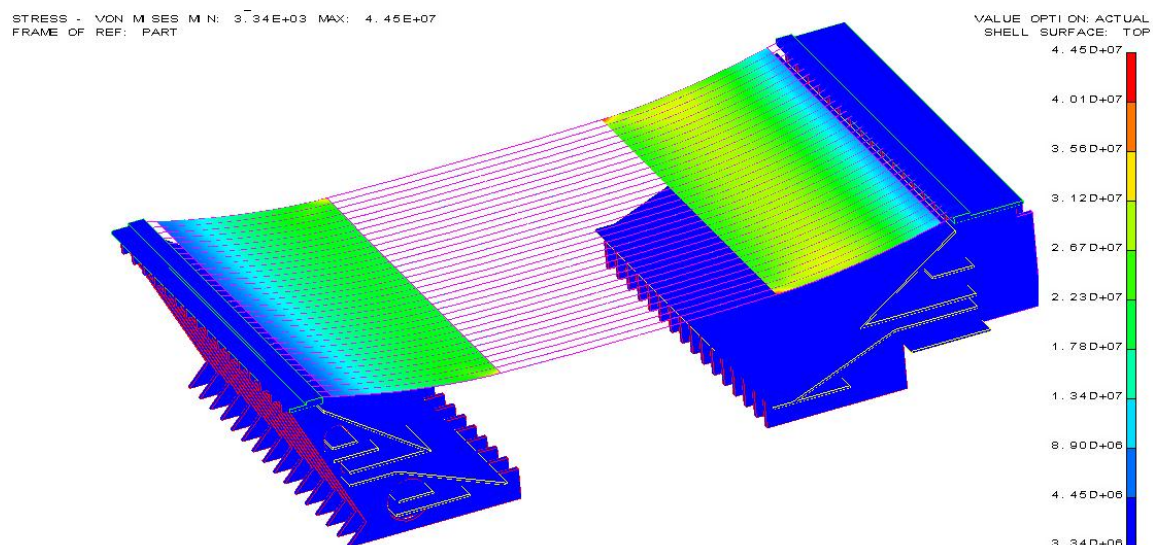


Fig. 82 y 83\_ Imágenes de los modelos realizados en I-DEAS

Estación de Servicio “Los Enlaces”:  $\sigma_{VM} = 3.03 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

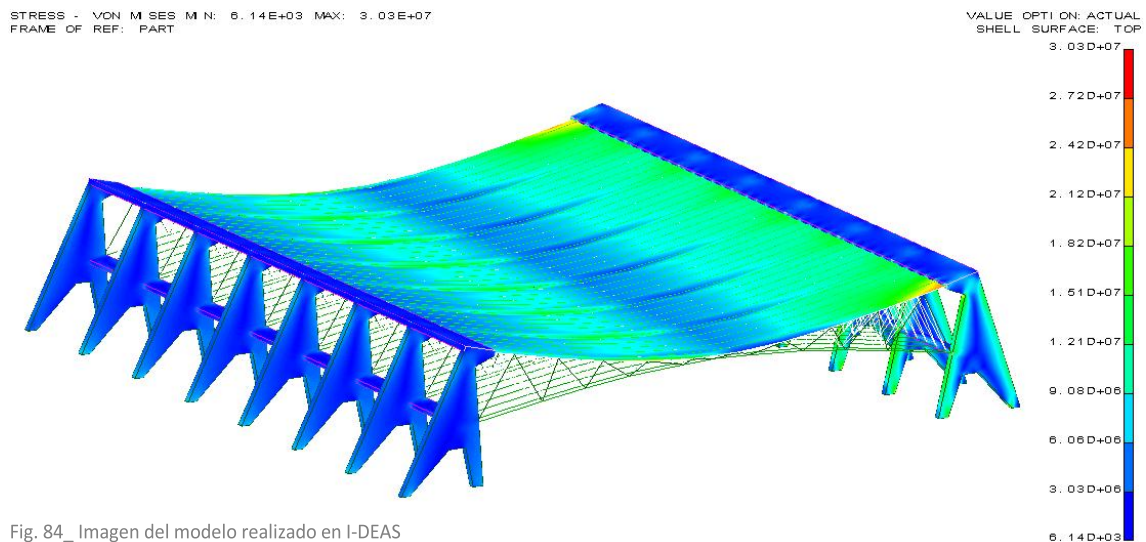


Fig. 84\_ Imagen del modelo realizado en I-DEAS

Cuando analizamos la tensión de von mises observamos como la **acción del viento** influye en el modo de trabajar de las diferentes cubiertas. Al tratarse de cables en suspensión únicamente aparecen esfuerzos de tracción debidos al peso propio. En caso de que la acción del viento fuera tal que superase estos esfuerzos, el cable dejaría de estar en suspensión y no soportaría ningún tipo de esfuerzo (ya que un cable no puede soportar compresiones debido a que no presenta rigidez alguna). Mediante sistemas de rigidización y estabilización podemos asegurar el correcto funcionamiento a tracción de los cables.

En el Pabellón de Portugal la lámina de hormigón no tiene otra función estructural que **aumentar el peso propio** de los cables para evitar que estos trabajen siempre a tracción, por lo que el peso de la lámina debe ser siempre superior a las condiciones más desfavorables de viento.

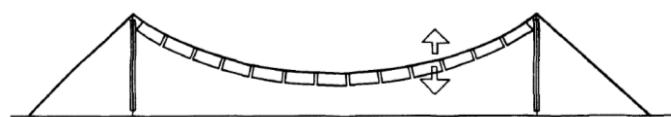


Fig. 85\_ Estabilización de la cubierta aumentando el peso propio

La situación en el Estadio de Braga es similar a pesar de no estar cubierto en su totalidad. Al situar todo el **peso en los extremos** que asegure la estabilidad de los cables, estos están sometidos a unas tensiones que nunca sufrirán los efectos del viento. Podríamos comparar este comportamiento al de un telar para bordar, donde el bastidor asegura que no se mueva la tela al dar las puntadas.

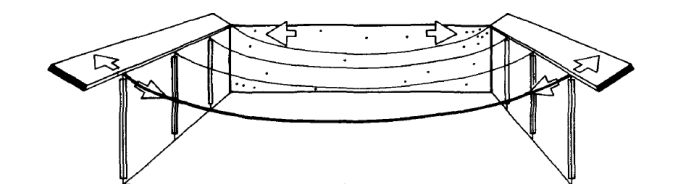


Fig. 86\_ Estabilización de la cubierta aumentando el peso en los extremos

Por último, la Estación de Servicio “Los Enlaces” asegura la estabilidad de la cubierta mediante un **sistema secundario de cables**. Si la acción de viento intentara levantar los paneles de la cubierta, el sistema principal de cables dejaría de trabajar y el sistema secundario aseguraría la estabilidad de la cubierta haciendo trabajar a tracción el conjunto de cables que lo componen. Podríamos afirmar que mientras un sistema de cables trabaja el otro se mantiene en reposo esperando un cambio en la dirección de las condiciones exteriores.

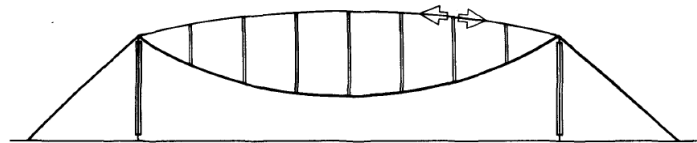


Fig. 87\_ Estabilización de la cubierta mediante un sistema secundario de cables

A continuación, veremos los resultados obtenidos para los pórticos de hormigón de los tres edificios.

### \_ Esfuerzos en los pórticos de hormigón. Tensiones mínimas y máximas

El hormigón armado es un material estructural que trabaja distinto a tracción que a compresión, por lo que necesitamos los **valores de tensiones máximas y mínimas** para dimensionar correctamente las secciones y calcular la armadura de acero. Así pues, las tensiones mínimas nos indican aquellos lugares donde el hormigón está sometido a **esfuerzos de compresión**, es decir, donde está trabajando a pleno rendimiento. Las tensiones máximas nos indican aquellos lugares donde el hormigón está sometido a **esfuerzos de tracción**, es decir, aquellos puntos donde está trabajando la armadura de acero. Un correcto dimensionado de los pórticos o, lo que es lo mismo, un buen diseño, como se dijo, influye en el flujo de esfuerzos de la estructura, por lo que viene condicionado (y condiciona) la forma de la cubierta.

Pabellón de Portugal:

Tensión mín. ppal.:  $\sigma_{\min} = 1.15 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

STRESS - MIN PRIN MIN: -1.15E+07 MAX: 3.49E+06  
FRAME OF REF: PART

VALUE OPTION: ACTUAL

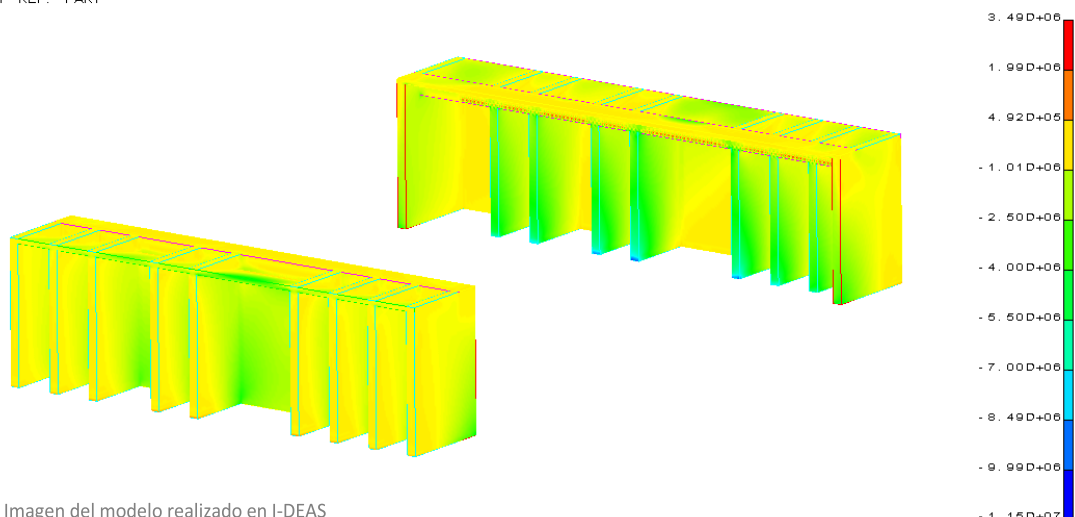


Fig. 88\_ Imagen del modelo realizado en I-DEAS

Tensión máx. ppal.:  $\sigma_{\text{máx}} = 1.09 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

STRESS - MAX PRIN MIN: -2.33E+06 MAX: 1.09E+07  
FRAME OF REF: PART

VALUE OPTION: ACTUAL

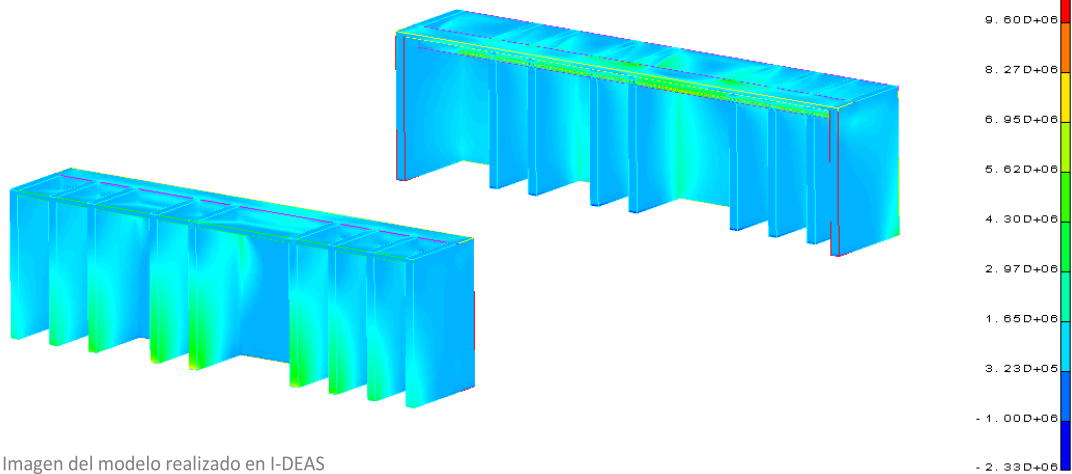


Fig. 89\_ Imagen del modelo realizado en I-DEAS

Podemos observar como los mayores valores para la tracción en el hormigón se dan en la parte exterior de los contrafuertes y los mayores para la compresión se sitúan en la parte interior de los mismos, siendo coherente con la distribución de las fuerzas producidas por la catenaria.



Fig. 90\_ Momentos en los pórticos

Estadio de Braga:

Tensión mín. ppal.:  $\sigma_{\text{mín}} = 1.25 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

STRESS - MIN PRIN MIN: -1.25E+07 MAX: 5.51E+06  
FRAME OF REF: PART

VALUE OPTION: ACTUAL

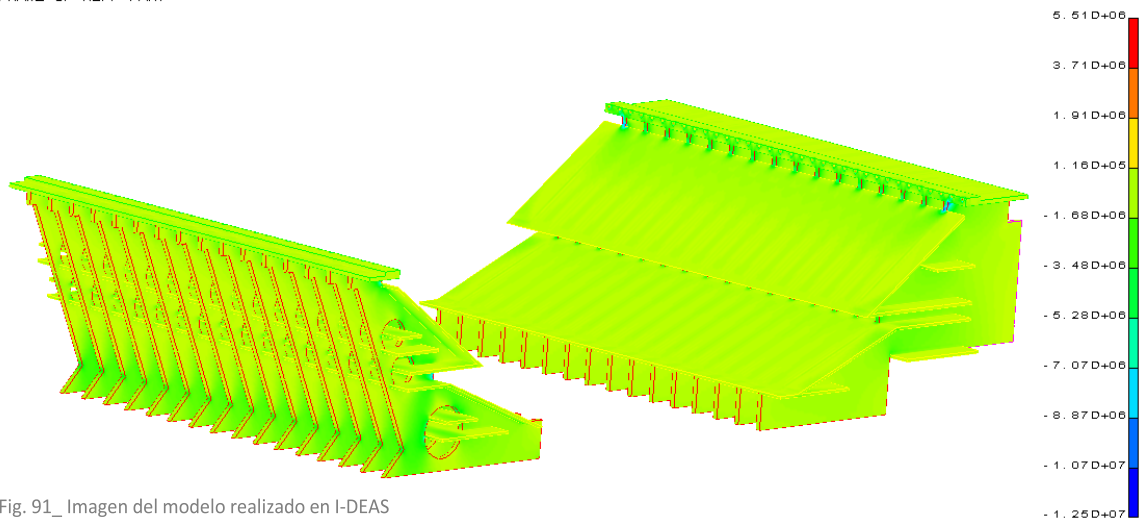


Fig. 91\_ Imagen del modelo realizado en I-DEAS

Tensión máx. ppal.:  $\sigma_{\text{máx}} = 2.76 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

STRESS - MAX PRIN MIN: -2.92E+06 MAX: 2.76E+07  
FRAME OF REF: PART

VALUE OPTI ON: ACTUAL

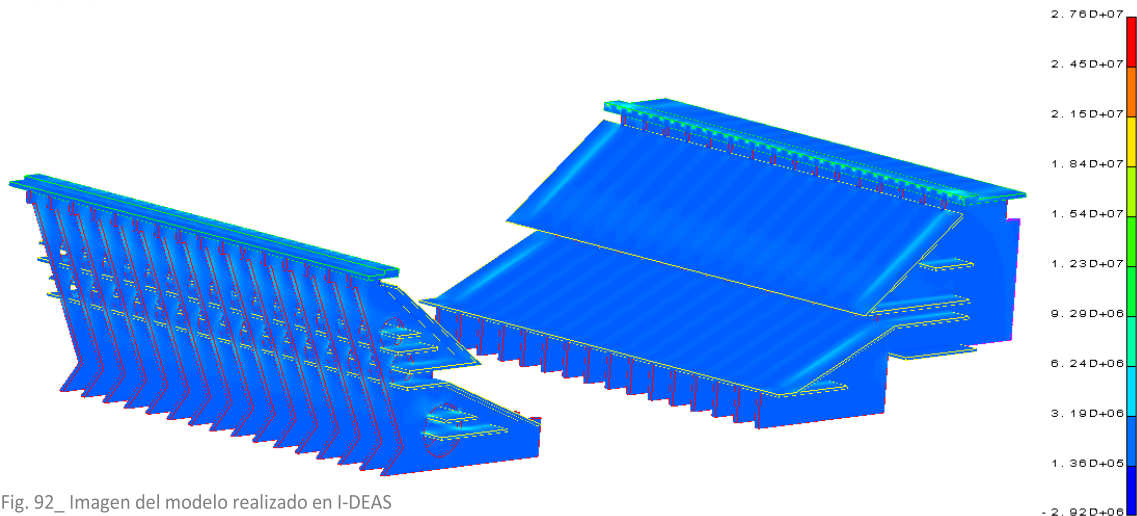


Fig. 92\_ Imagen del modelo realizado en I-DEAS

En este caso, debido a la geometría de los contrafuertes, observamos una distribución de los esfuerzos mucho más homogénea, donde podemos afirmar que el hormigón trabaja en casi su totalidad a compresión, lo que hace que sea una estructura mucho más eficiente. En las zonas de paso y conexión entre los contrafuertes podemos observar valores de tracción, así como en los extremos de las láminas para los graderíos.

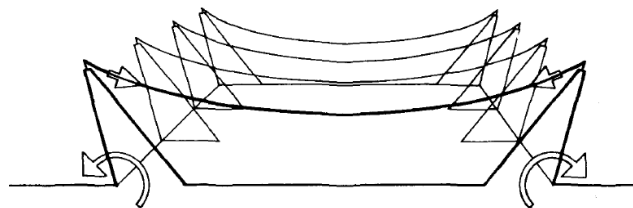


Fig. 93\_ Momentos en la base

Estación de Servicio “Los Enlaces”:

Tensión mín. ppal.:  $\sigma_{\text{mín}} = 3.04 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

STRESS - MIN PRIN MIN: -3.04E+07 MAX: 1.12E+07  
FRAME OF REF: PART

VALUE OPTI ON: ACTUAL

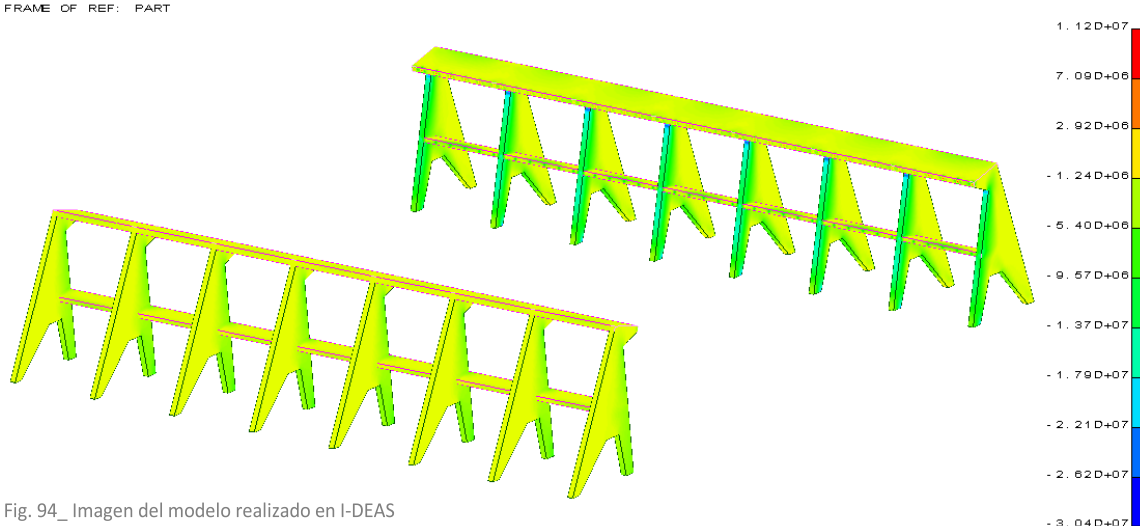


Fig. 94\_ Imagen del modelo realizado en I-DEAS

Tensión máx. ppal.:  $\sigma_{\text{máx}} = 3.78 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

STRESS - MAX PRIN MIN: -5.40E+06 MAX: 3.78E+07  
FRAME OF REF: PART

VALUE OPTION: ACTUAL

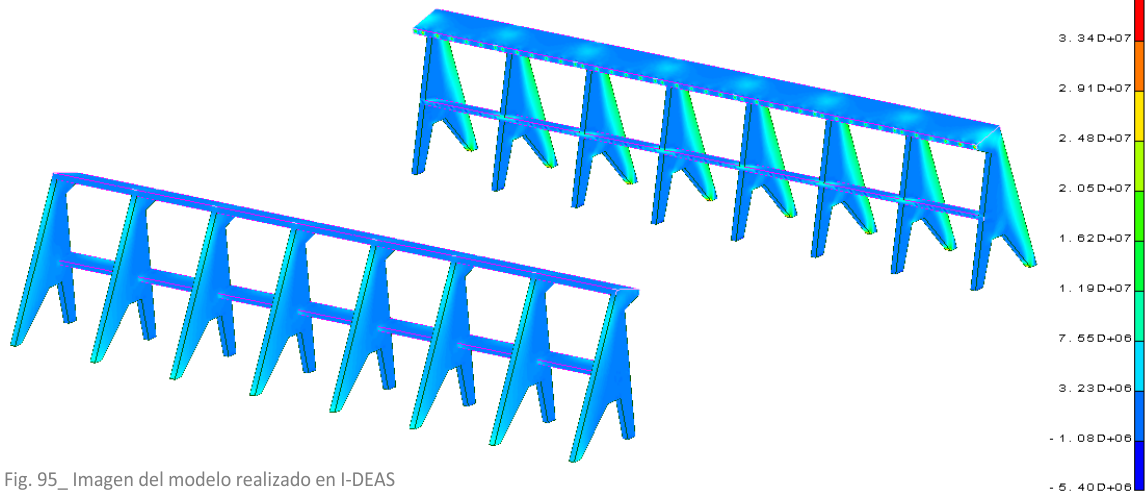


Fig. 95\_ Imagen del modelo realizado en I-DEAS

Por último, vemos como las pajaritas tienen un comportamiento similar a los pórticos del Pabellón de Portugal: los mayores valores para la tracción en el hormigón se dan en la parte exterior de las pajaritas y los mayores para la compresión se sitúan en la parte interior de las mismas, siendo coherente con la distribución de las fuerzas producidas por la catenaria. A diferencia de los contrafuertes del Pabellón, aquí la geometría refleja la distribución de los esfuerzos y permite reconocer qué parte trabaja a tracción y cual a compresión.



Fig. 96\_ Momentos en los pórticos

Completando el cuadro resumen anterior tenemos los siguientes resultados donde podemos observar la relación entre las diferentes magnitudes y los valores obtenidos para cada una de ellas:

	Luz (m)	Altura máxima (m)		Sec. Cables (mm)	Esfuerzos en cables de acero		Esfuerzos en pórticos de hormigón	
		cables	pórticos		Tensiones en cables (N/m <sup>2</sup> )	Tensión Von Mises (N/m <sup>2</sup> )	Tensión mín ppal. (N/m <sup>2</sup> )	Tensión máx ppal. (N/m <sup>2</sup> )
Pabellón Portugal	<b>58</b>	14	16	10	49860860	1.04x10 <sup>4</sup>	1.15 x10 <sup>7</sup>	1.09 x10 <sup>7</sup>
Estadio de Braga	<b>160</b>	40	40	10	53263058	1.04x10 <sup>4</sup>	1.25 x10 <sup>7</sup>	2.76 x10 <sup>7</sup>
Estación Servicio	<b>41</b>	10.6	10.6	14.5	92527437	1.04x10 <sup>4</sup>	3.04 x10 <sup>7</sup>	3.78 x10 <sup>7</sup>

Tras el cálculo mediante I-DEAS podemos completar el cuadro anterior. De esta forma podemos comparar fácilmente los resultados obtenidos, así como el orden de magnitud de los mismos en función de las dimensiones de cada estructura.

Así pues, vemos que el Estadio de Braga posee unas **tensiones en los cables** muy bajas en relación a su luz y la sección de los mismos si comparamos con las otras dos estructuras, donde la Estación de Servicio posee el valor de tensiones más alto. Este valor podría mejorarse (reducirlo) si aumentásemos la sección del acero, ya sea aumentando el número de cables o aumentando la sección de los existentes en la cubierta.

En cuanto a los **esfuerzos en los pórticos**, obtenemos la misma conclusión que para los cables. El Estadio de Braga posee unas tensiones de compresión muy bajas en relación a su luz si comparamos con las otras dos estructuras, donde, otra vez, la Estación de Servicio posee el valor más alto. Aunque hay que señalar que tanto el Pabellón de Portugal como la Estación de Servicio poseen un comportamiento muy similar frente a esfuerzos de tracción como de compresión (orden de magnitud de los valores muy similares). En cambio, en el Estadio de Braga se aprecia una clara preferencia a soportar los esfuerzos de compresión, lo que hace que esté muy optimizada, dado que son esfuerzos que mejor soporta el hormigón. Esta observación ya se apreció anteriormente al analizar la distribución de tensión en los pórticos, dejando clara la eficiencia de los mismos.



## 9\_ LA ESTRUCTURA COMO ARQUITECTURA. CONCLUSIONES

El uso de la estructura resistente como el **elemento expresivo** principal no siempre contribuye de manera sincera a la realidad del proyecto. El abandono de lo cuantitativo por centrarse en lo cualitativo hace que la estructura resistente pase a un segundo plano, dejando de ser una necesidad a ser una intención más en la arquitectura.

Como hemos podido observar, el conocimiento de las **leyes de redistribución de fuerzas** para generar formas sinceras es el requisito para el diseño de cualquier sistema estructural y, por lo tanto, esencial para el diseño estructural. Pero el conocimiento de las mismas no conlleva su aplicación, por lo que el modo más riguroso para comprobar la sinceridad estructural de los edificios es analizar su estructura a través del **cálculo**. De este modo, podemos obtener una respuesta objetiva y, de este modo, analizar y reconsiderar su función con la arquitectura.

Al inicio de este texto se lanzaban una serie de preguntas que retomaremos ahora, una vez tenemos los análisis de los resultados del cálculo de las tres cubiertas: ¿es sincera su estructura? ¿su forma está determinada por cuestiones expresivas o estructurales? ¿hasta qué punto puede optimizarse su estructura sin perder esas cuestiones expresivas?

En cuanto a la primera pregunta, podemos afirmar sin ninguna duda que los tres edificios poseen una **estructura sincera**, y no solamente su cubierta, como era de esperar dada la forma catenaria que presentaban, dado que sus elementos resuelven el flujo interior de fuerzas.

Respondiendo a la segunda cuestión, debemos afirmar que su forma está determinada tanto por **cuestiones expresivas como estructurales**, prevaleciendo las primeras sobre las segundas. Esto quiere decir que, a la hora de diseñar una estructura, la idea que guíe una forma estructural estará siempre dentro de un abanico de posibilidades que hagan posible esta idea. O lo que es lo mismo, debemos ser capaces de manejar las cuestiones estructurales en favor de nuestro deseo. Solo de este modo, podemos superar la barrera existente entre el diseño estructural y las formas arquitectónicas.

Y, en cuanto a la última pregunta, ha quedado desvelada en la respuesta anterior, ya que la optimización de una estructura es una cuestión estructural y, por lo tanto, debe estar dominada por las cuestiones expresivas. Para explicarlo fácilmente partiremos de un ejemplo como es la optimización de una de nuestras estructuras de análisis: ¿cómo repercutiría expresivamente la optimización de la estructura de la Estación de Servicio “Los Enlaces” de Yarza?

Como hemos visto, por un lado, la cubierta formada por cables trabaja a tracción siguiendo una curva catenaria y, por otro, las pajaritas de hormigón trabajan en parte a tracción y parte a compresión.

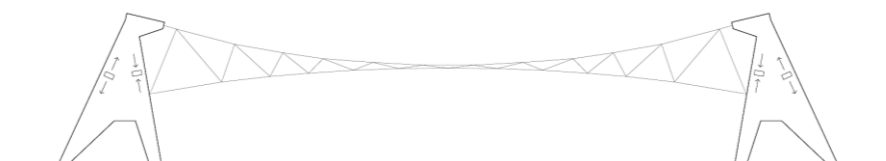


Fig. 97\_ Comportamiento de las pajaritas

Sabemos que el hormigón trabaja muy bien a compresión, pero es poco eficiente ante esfuerzos de tracción, por lo que necesita de la armadura interior para soportarlos. ¿Qué pasaría si separásemos los esfuerzos de tracción y de compresión que soporta la pajarita? Es decir, ¿cómo repercutiría expresivamente si hiciéramos trabajar al hormigón únicamente a compresión y al acero a tracción?



Fig. 98\_ Optimización de las pajaritas

De este modo, la estructura estaría soportando los mismos flujos de fuerza que la estructura original y de una manera mucho más eficiente, es decir, estaría optimizada (sin atender al posible redimensionado de los elementos). Pero es evidente que, expresivamente, no tiene nada que ver con la estructura original dado que se ha perdido la característica principal que poseía: la imagen característica de las pajaritas.

A esto nos referimos cuando afirmamos que **debemos ser capaces de manejar las cuestiones estructurales en favor de las cuestiones expresivas**.

Por último, vivimos ante una nueva forma de hacer arquitectura. Las **herramientas tecnológicas avanzadas**, como el método de los elementos finitos, permiten realizar simulaciones virtuales y diseñar edificios singulares que, posteriormente, son viables estructurales. Esto es posible gracias a la capacidad que poseen para visualizar el estado tensional real, lo que permite adaptar el estado tensional a la forma del edificio en su fase de diseño realizando infinidad de pruebas (no solo de formas, sino también en cuanto al uso de materiales) a coste cero.

Así pues, partiendo del conocimiento de los flujos de fuerzas como requisito indispensable y elemento conceptual previo para el diseño de estructuras, podemos garantizar el correcto comportamiento resistente de estas nuevas arquitecturas gracias a las nuevas herramientas que se disponen para el cálculo.

Esto es lo que no podemos olvidar y debemos tener claro: tanto la herramienta de cálculo como las fuerzas y sus leyes a las cuales está sometida una estructura están al servicio de los diseñadores, ya sean arquitectos o ingenieros. Si queremos conseguir estructuras sinceras y que, además, den forma a nuestra arquitectura debemos ser capaces de dominar los flujos de fuerzas sin abandonar nuestro criterio al poder de las nuevas tecnologías.

## **10\_ BIBLIOGRAFÍA**

### **\_ Libros**

Engel, Heino. "Sistemas Estructurales". GG. 2003  
Ching, Francis D. K. "Manual ilustrado de estructuras". GG. 2014  
Chaleston, Andrew. "La estructura como arquitectura". Editorial Reverte. 2007  
Cervera, Jaime. "Las estructuras en las áreas deportivas". Capítulo 3 de "Curso de Arquitectura Deportiva". (ed desconocida y año)  
García, David. "La estructura y el proyecto". Escola Sert. 2004  
Schierle, G G. "Architectural Structures". G Schierle. 1990-2006  
Varios autores. "Números gordos en el proyecto de estructuras". Cinter Divulgación Técnica. 2001

### **\_ Artículos**

Azagra, D., Bernabeu, A. "La estructura de las formas libres". Informes de la Construcción. 2012  
Manterola, Javier. "La estructura resistente en la arquitectura actual, parte I y II". Informes de la Construcción. 1998  
Azagra, D., Bernabeu, A." Searching for the right form. The role of structural engineers in the desing of two complex-geometry buildings in Madrid". The Structural Engineer. 2010  
Labarta, C., Alfaro, J. A. "Proyecto, docencia e investigación: construcción y visualidad en dos cubiertas, Zaragoza, 1964"

### **\_ Cuadernos**

Cervera, Jaime. "Diseño de estructuras en la edificación". Cuadernos del Instituto Juan de Herrera. Madrid 1993  
Cervera, Jaime. "Forma y esfuerzos estructurales". Cuadernos del Instituto Juan de Herrera. Madrid 2002  
Aroca, Ricardo. "¿Qué es estructura?". Cuadernos del Instituto Juan de Herrera. Madrid 1999

### **\_ Trabajos**

Varios autores. "Edificaciones Especiales: Cubiertas Catenarias". UTL-FA. 20013

### **\_ Webs**

<http://www2.caminos.upm.es/departamentos/matematicas/Fdistancia/PIE/Chip%20geométrico/Catenaria.pdf>  
<http://www.metalica.com.br/estruturas-tensionadas-para-grandes-vaos>  
[http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/ESTUDIO\\_Y\\_APLICACIÓN\\_DE\\_LA\\_CATENARIA](http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/ESTUDIO_Y_APLICACIÓN_DE_LA_CATENARIA)

## 11\_ REFERENCIA DE IMÁGENES

Fig. 20, 24, 28, 32, 37 a 44, 85 a 87, 90, 93 y 96\_ Diagramas procedentes del libro de Heino Engel, “Sistemas Estructurales”, Editorial GG, 2003.

Fig. 66 a 72\_ Documentación gráfica del apartado de la Estación de Servicio “Los Enlaces” del capítulo 4 procedente del artículo de C. Labarta y J. A. Alfaro, “Proyecto, docencia e investigación: construcción y visualidad en dos cubiertas, Zaragoza, 1964”.

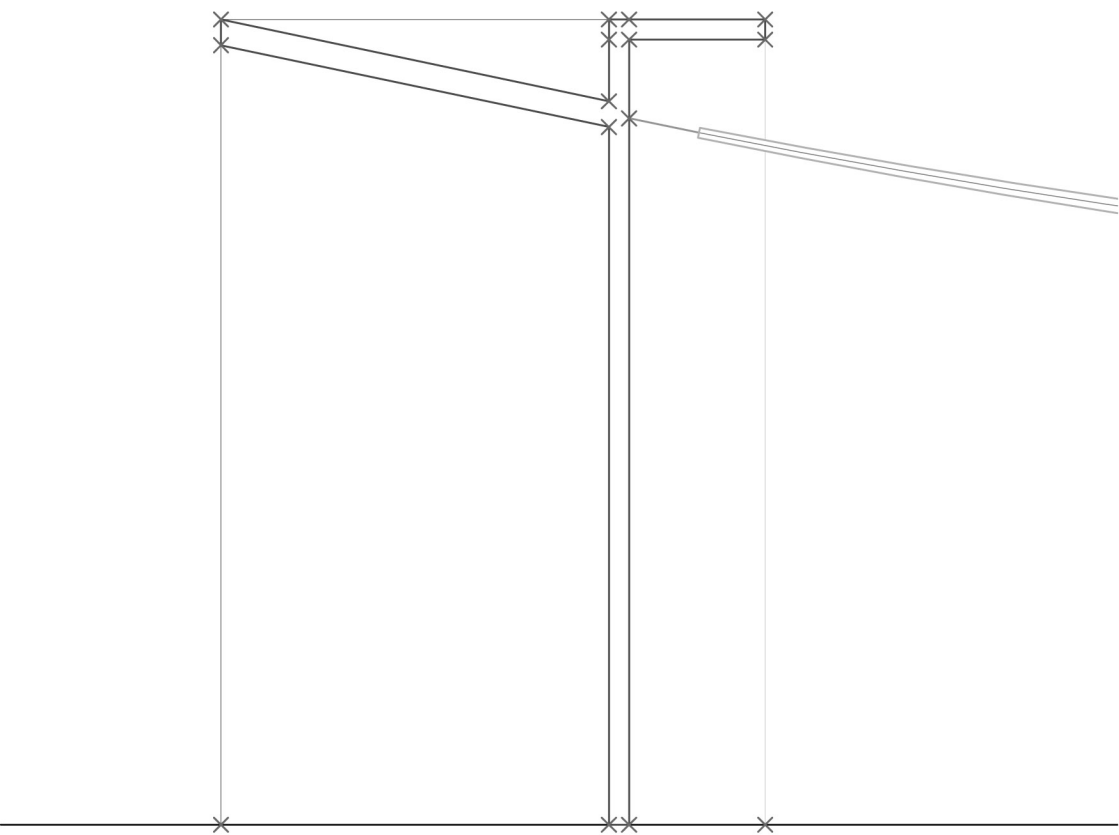
Fig 73 a 76, 79 a 84, 88, 89, 91, 92, 94 y 95\_ Modelos de cálculo y diagramas de esfuerzos resultado del proceso estructural en I-DEAS.

Fig. 97 y 98\_ Diagramas propios.

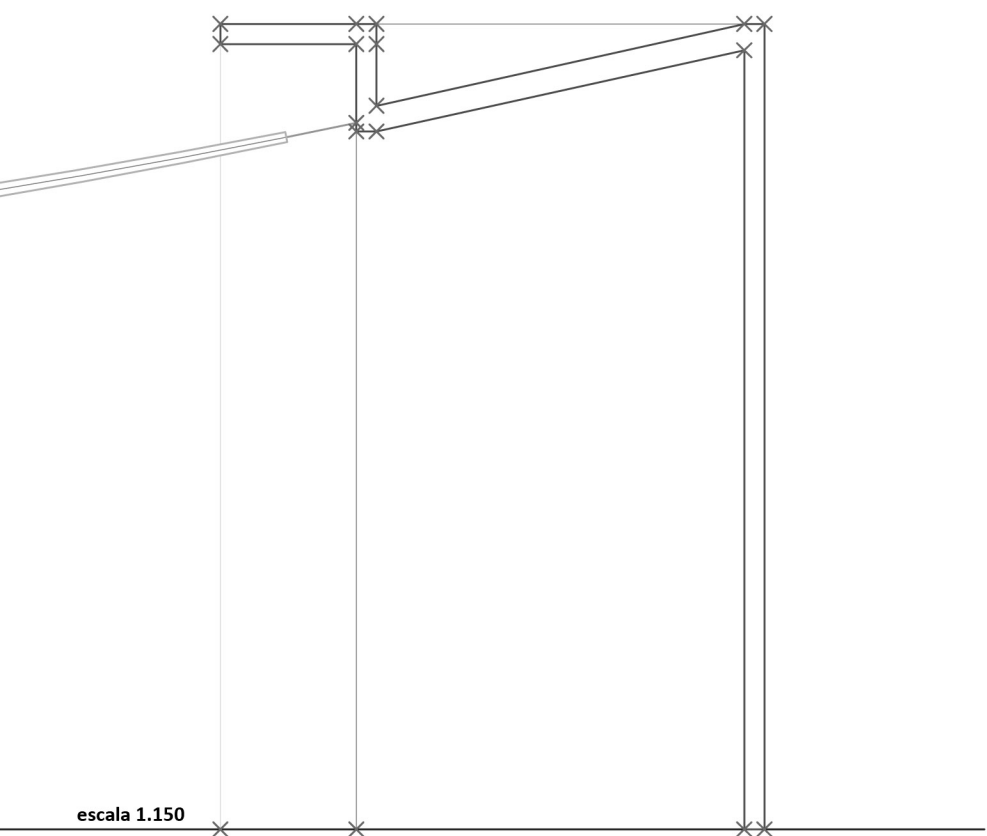
Resto de imágenes procedentes de diferentes fuentes consultadas en internet y de dominio público.

## 12\_ ANEXO

1\_ PABELLÓN DE PORTUGAL, ÁLVARO SIZA



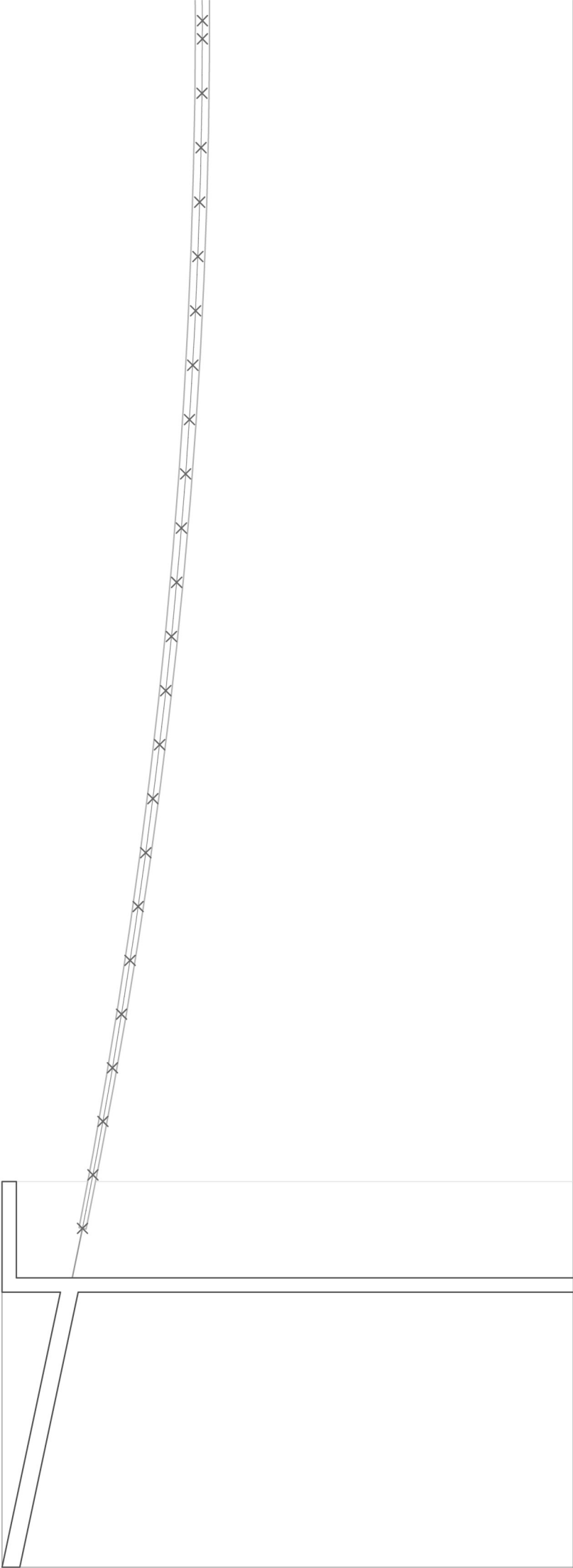
PÓRTICO IZQUIERDA		
X	Y	Z
0.0	0.0	0.0
7.7	0.0	0.0
8.1	0.0	0.0
10.8	0.0	0.0
10.8	15.6	0.0
10.8	16	0.0
7.7	16	0.0
0.0	16	0.0
0.0	15.5	0.0
7.7	15.6	0.0
7.7	14.4	0.0
7.7	13.9	0.0
8.1	15.6	0.0
8.1	14.1	0.0
8.1	16	0.0



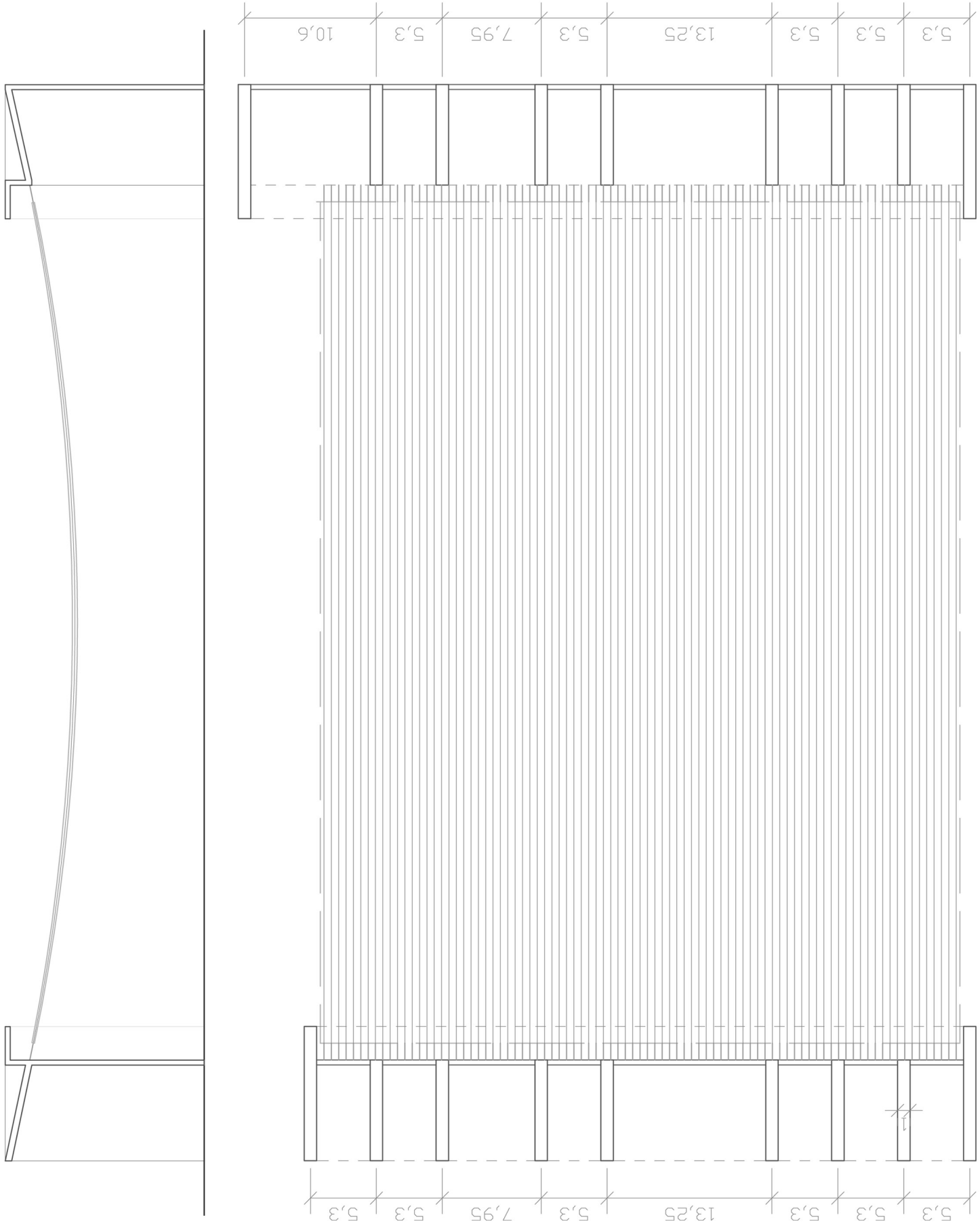
PÓRTICO DERECHA		
X	Y	Z
75.8	0.0	0.0
78.5	0.0	0.0
86.2	0.0	0.0
86.6	0.0	0.0
86.6	16	0.0
86.2	16	0.0
78.9	16	0.0
75.8	16	0.0
75.8	15.6	0.0
78.5	15.6	0.0
78.5	13.9	0.0
78.9	13.9	0.0
78.9	14.4	0.0
78.9	15.6	0.0
78.5	14.1	0.0
78.5	16	0.0

CABLES (MITAD CATENARIA)		
X	Y	Z
8.1	14.1	0.0
9.5	13.8	0.0
11	13.5	0.0
12.5	13.2	0.0
14	12.9	0.0
15.5	12.6	0.0
17	12.4	0.0
18.5	12.2	0.0
20	12	0.0
21.5	11.8	0.0
23	11.6	0.0
24.5	11.4	0.0
26	11.2	0.0
27.5	11.1	0.0
29	11	0.0
30.6	10.9	0.0
32.1	10.8	0.0
33.7	10.7	0.0
35.2	10.6	0.0
36.7	10.5	0.0
38.2	10.5	0.0
39.7	10.4	0.0
41.2	10.4	0.0
42.8	10.4	0.0
43.3	10.4	0.0

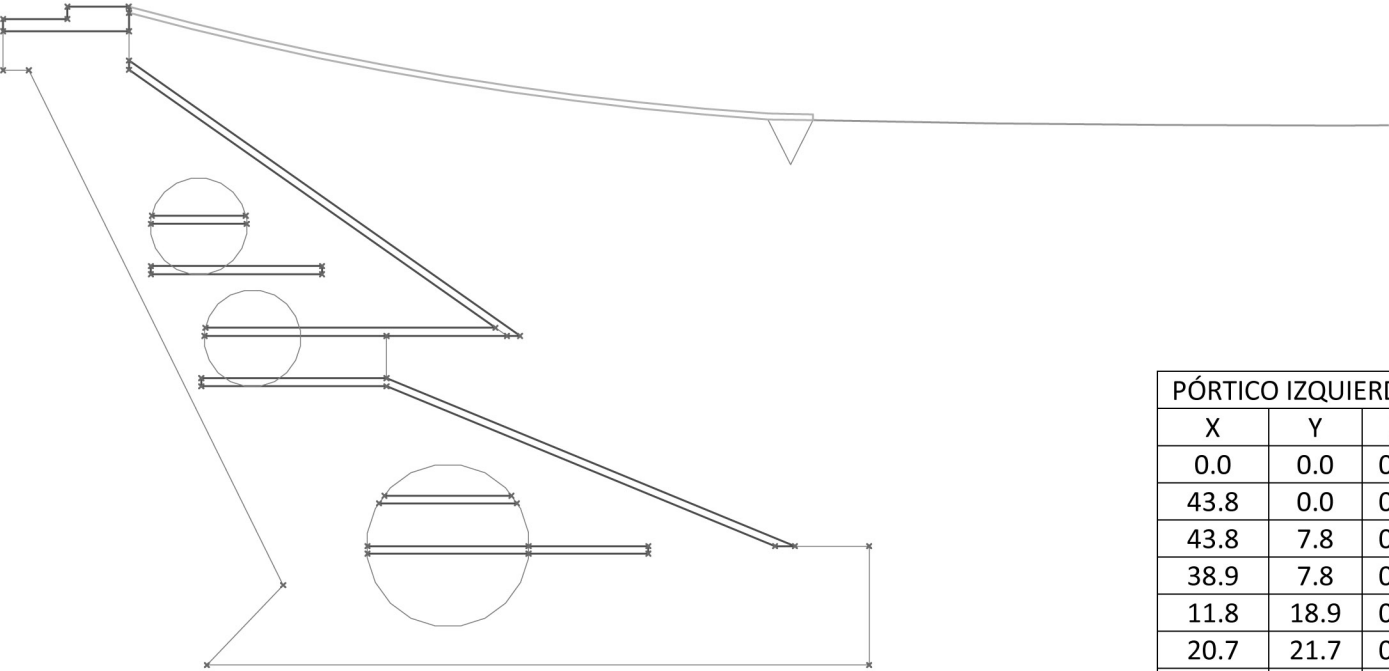
escala 1.150



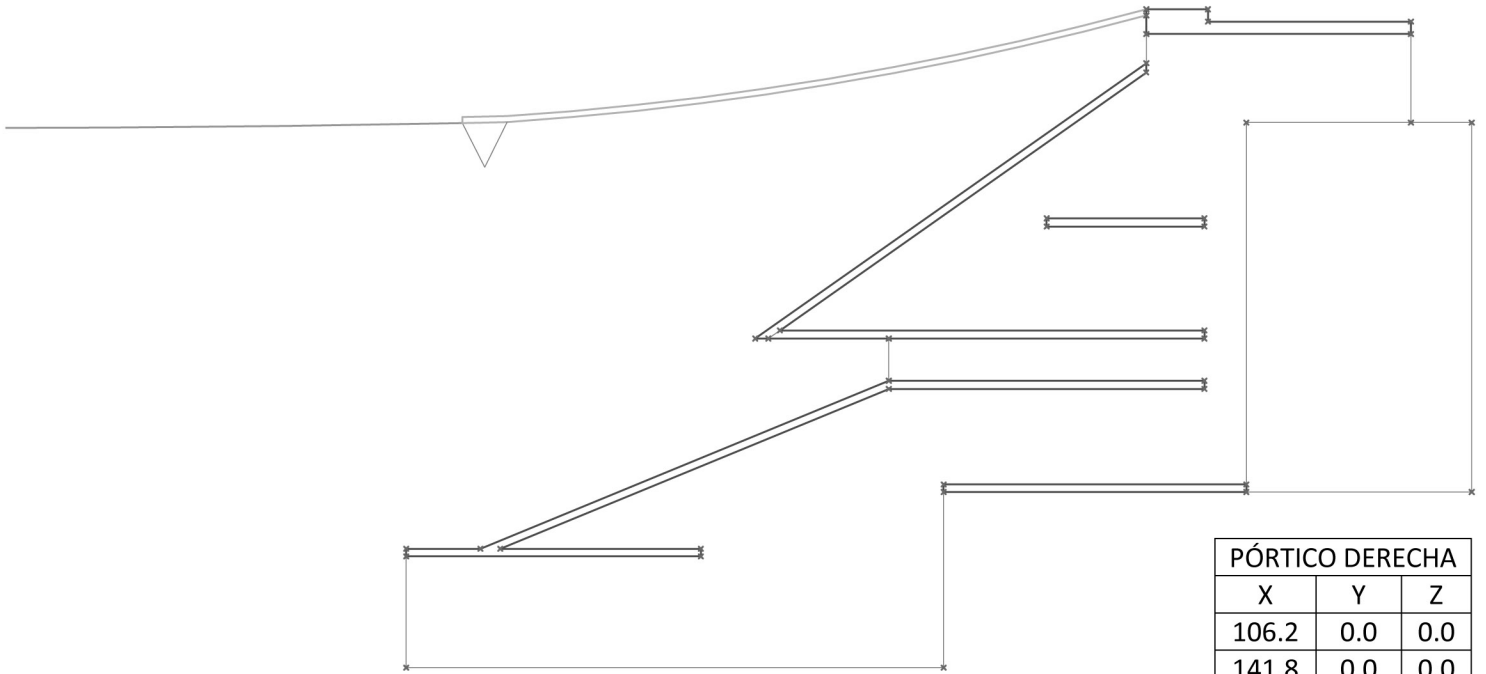


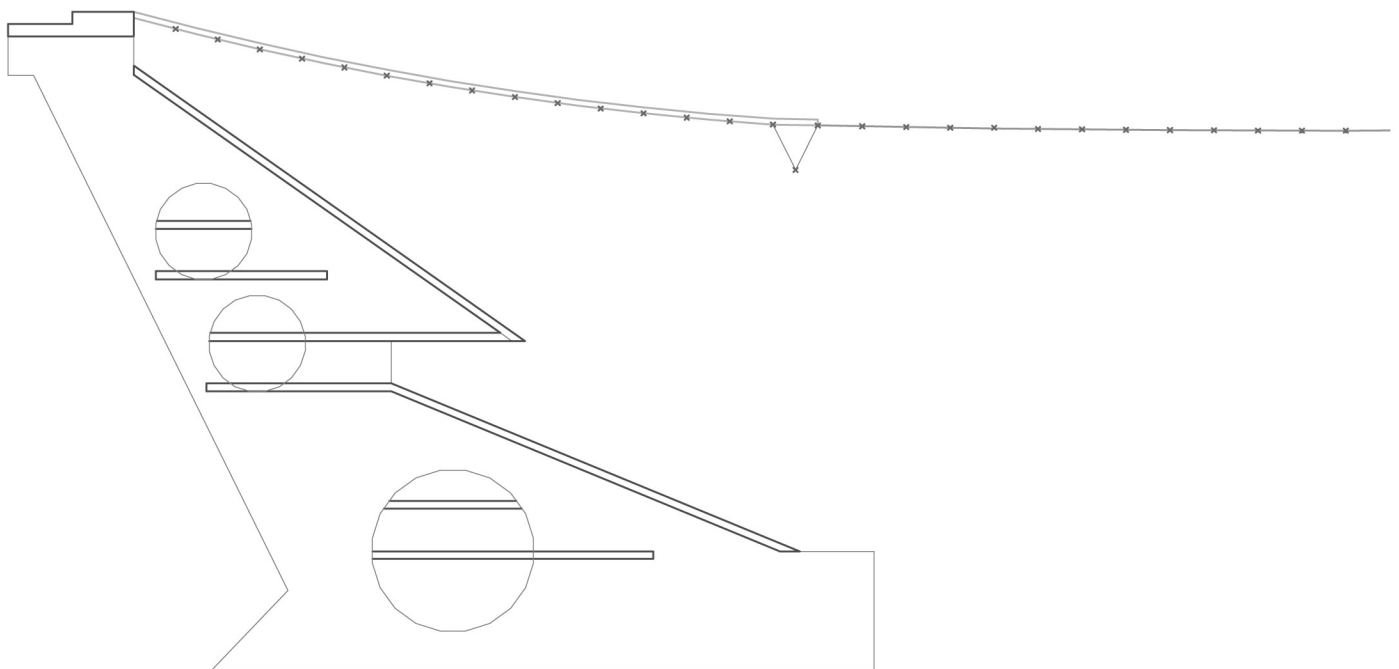


2\_ ESTADIO DE BRAGA, EDUARDO SOUTO DE MOURA

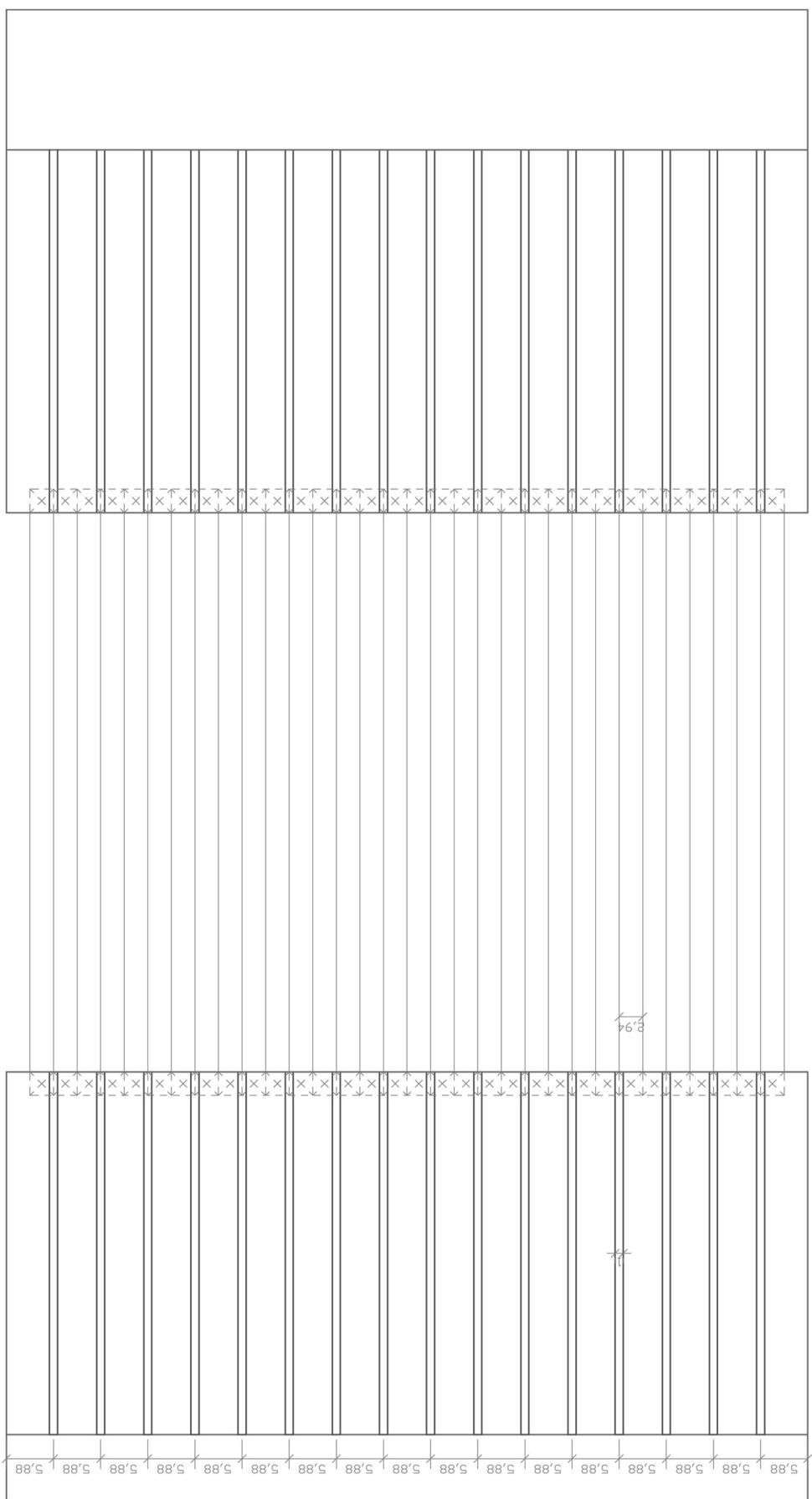


PÓRTICO IZQUIERDA		
X	Y	Z
0.0	0.0	0.0
43.8	0.0	0.0
43.8	7.8	0.0
38.9	7.8	0.0
11.8	18.9	0.0
20.7	21.7	0.0
-5.1	40	0.0
-5.1	41.9	0.0
-5.1	43.1	0.0
-9.2	43.5	0.0
-9.2	42.7	0.0
-13.4	42.7	0.0
-13.4	41.9	0.0
-13.4	39.4	0.0
-11.78	39.4	0.0
5	5.2	0.0
11.8	21.7	0.0
-3.6	29.7	0.0
-3.7	29.2	0.0
2.5	29.7	0.0
-3.7	29.2	0.0
-3.7	26.4	0.0
7.6	25.8	0.0
7.6	26.4	0.0
0.0	25.8	0.0
-0.1	21.7	0.0
19	22.3	0.0
19.8	21.7	0.0
-0.3	18.9	0.0
-0.3	18.4	0.0
11.8	18.4	0.0
11.7	11.2	0.0
11.3	10.7	0.0
20.1	11.2	0.0
20.5	10.7	0.0
10.6	7.8	0.0
10.6	7.3	0.0
29.2	7.8	0.0
29.2	7.3	0.0
-5.1	39.4	0.0
37.5	7.8	0.0

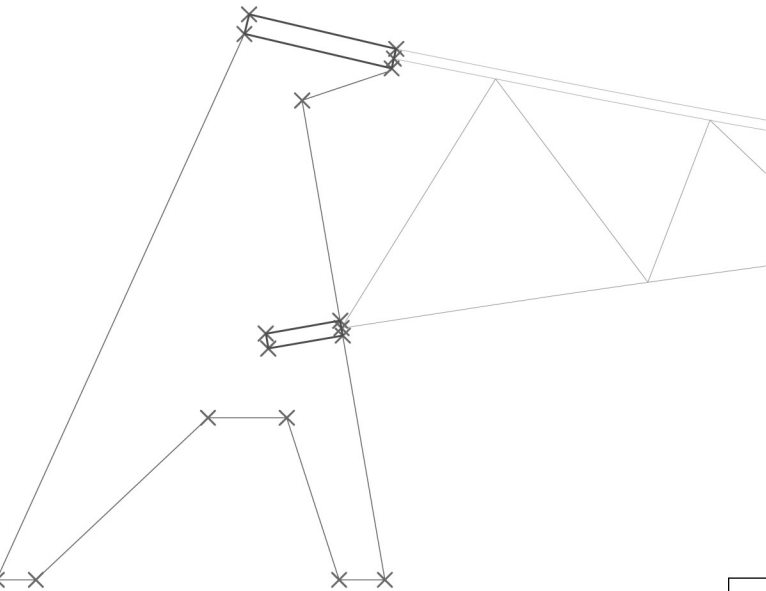
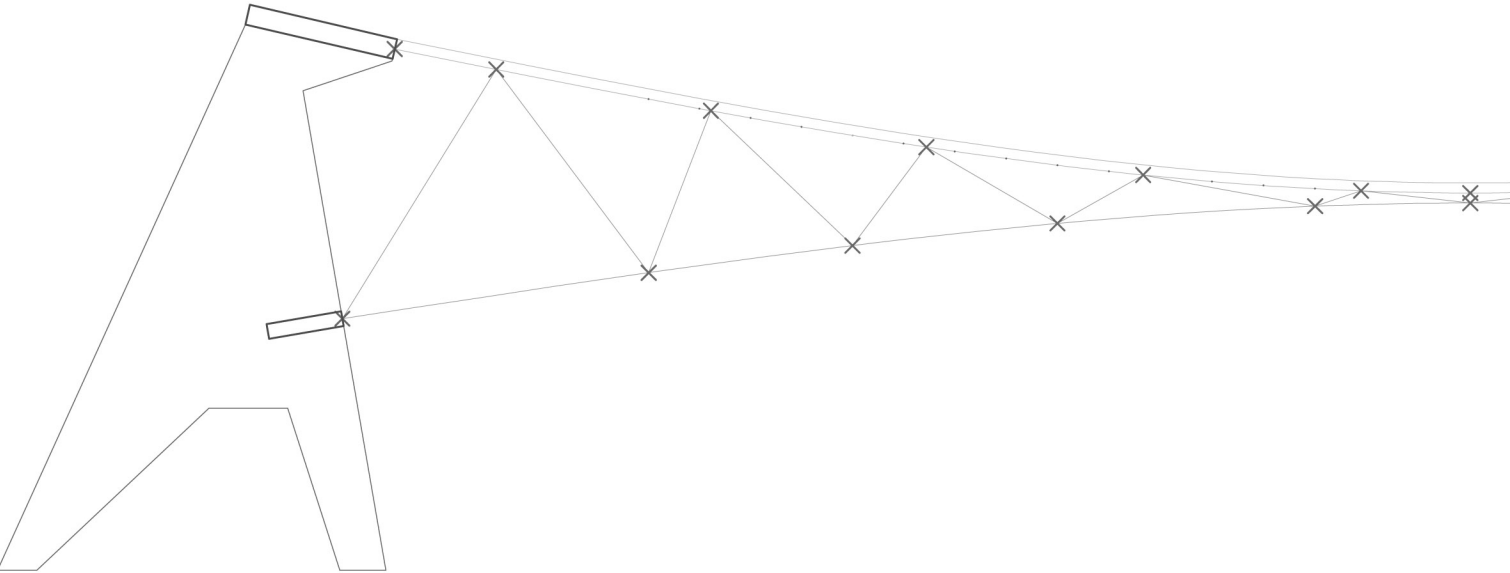




CABLES (MITAD CATENARIA)		
X	Y	Z
-2.3	42.4	0.0
0.3	41.7	0.0
3.1	41.1	0.0
5.9	40.4	0.0
8.7	39.9	0.0
11.5	39.3	0.0
14.3	38.8	0.0
17.2	38.3	0.0
20	37.9	0.0
22.8	37.5	0.0
25.7	37.1	0.0
28.5	36.8	0.0
31.4	36.5	0.0
34.2	36.3	0.0

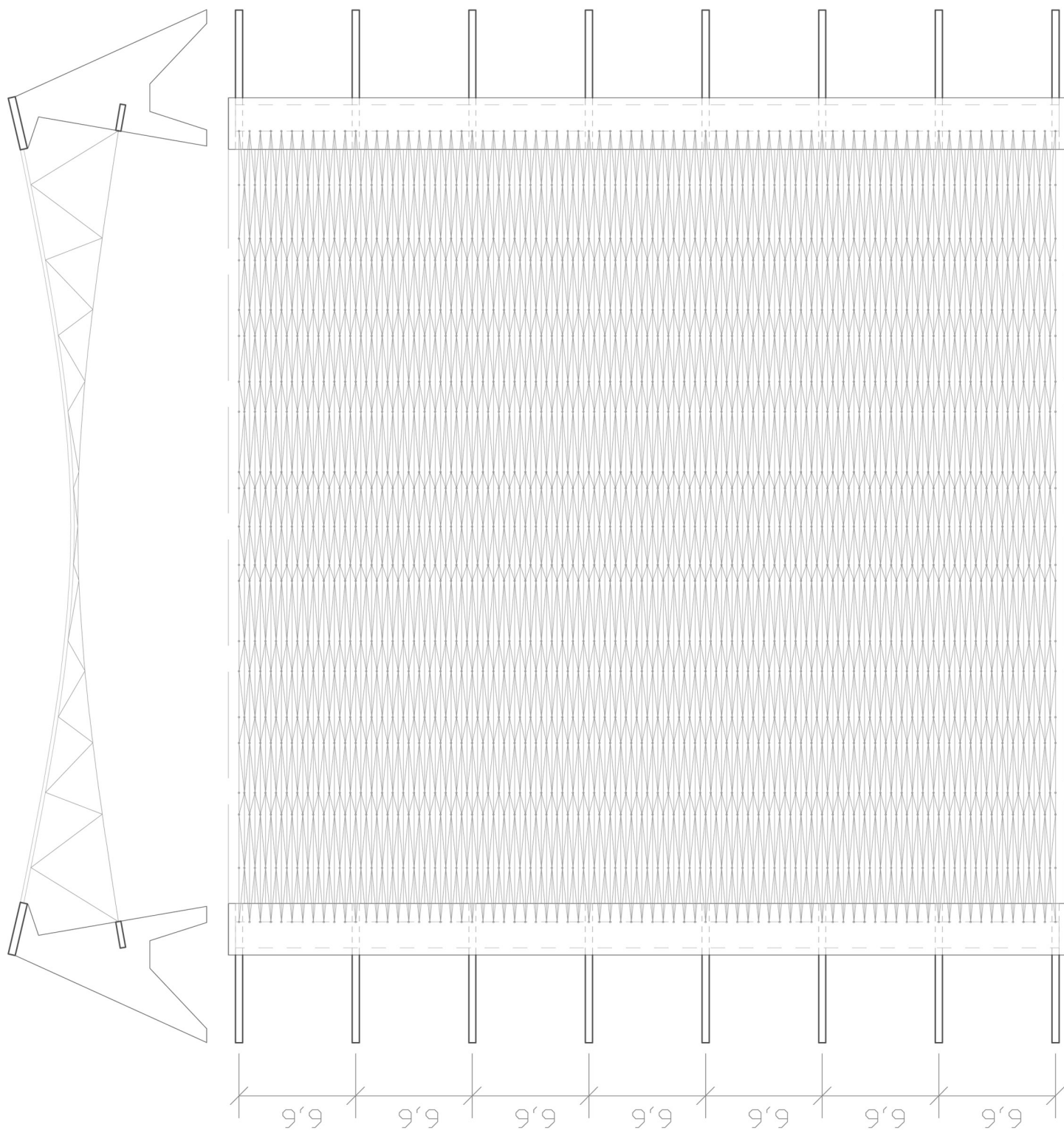


3\_ ESTACIÓN DE SERVICIO “LOS ENLACES”, JOSÉ DE YARZA



PAJARITA		
X	Y	Z
0.02	-0.14	0.0
0.86	-5	0.0
-0.04	-5	0.0
-1.08	-1.78	0.0
-2.64	-1.78	0.0
-6.06	-5	0.0
-6.84	-5	0.0
-1.92	5.84	0.0
-1.83	6.23	0.0
1.08	5.54	0.0
0.99	5.16	0.0
-0.78	4.52	0.0
-0.02	0.14	0.0
-1.5	-0.1	0.0
-1.45	-0.4	0.0

CABLES (MITAD CATENARIA)		
X	Y	Z
0.0	0.0	0.0
6.08	0.91	0.0
10.12	1.45	0.0
14.19	1.89	0.0
19.31	2.17	0.0
22.39	2.29	0.0
1.04	5.35	0.0
3.05	4.95	0.0
7.31	4.13	0.0
11.59	3.4	0.0
15.89	2.85	0.0
20.22	2.53	0.0





## 2\_ TIPOS DE ELEMENTOS. MALLADO

Dependiendo de la dimensión, los elementos finitos básicos se pueden dividir en tres categorías: línea (1D), área (2D) y volumen (3D). Dentro de estas tres categorías, para nuestro trabajo se ha hecho uso de los elementos beam, shell y solid, respectivamente.

La selección del tipo de elementos depende tanto de la complejidad que se le quiere dar a la malla como del tipo de resultados esperados. Es decir, por un lado, podemos mallar nuestra estructura teniendo en cuenta de antemano los problemas al pasar de elementos tridimensionales a bidimensionales. Por otro, si nos interesa únicamente conocer un comportamiento determinado podemos hacer uso de un tipo de elemento que nos proporcione esa información obviando el resto de esfuerzos, de esta manera se simplifica el proceso de cálculo.



\_ Los elementos BEAM son elementos unidimensionales que poseen seis grados de libertad por nodo, esto es, tres desplazamientos y tres giros sobre los ejes globales.

\_ Los elementos SHELL son elementos bidimensionales con dos grados de libertad en cada nodo, es decir, dos desplazamientos y un giro. Como regla, se prefieren los elementos cuadriláteros a los triangulares por razones de isotropía geométrica, reservando su uso a aquellas zonas a modelizar con irregularidades.

\_ Los elementos SOLID son elementos tridimensionales con tres grados de libertad traslacional (de desplazamiento) por nodo.

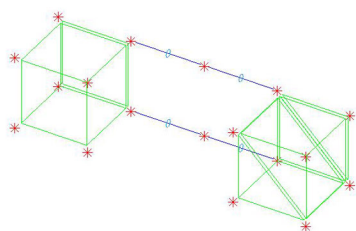
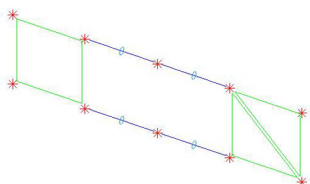
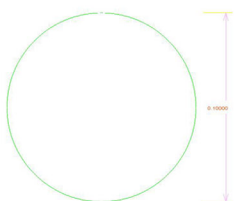
### \_ Proceso de mallado

\_ En primer lugar debemos crear los nodos mediante la función *Node > Create*.

\_ Una vez hemos creado los nodos, debemos mallar mediante los elementos SHELL, triangulares o cuadrados según la geometría del área a cubrir. De este modo usaremos la función *Element > Create*.

\_ Si vamos a introducir un elemento BEAM (1D) debemos definir previamente su sección en el menú *Meshing* e introducir el tipo de sección (circular, cuadrada, hueca, ...). Una vez la tenemos, debemos guardarla mediante la opción *Store*. Una vez tenemos almacenado nuestro perfil, ya podemos introducir nuestro elemento BEAM.

\_ Por último, para crear elementos SOLID (3D) debemos extruir los elementos SHELL (2D) que hemos introducido al mallar nuestra geometría. Para ello haremos uso de la función *Element > Multiple Create > Extrude > Translate > Solid*.



Son muchas las posibilidades que nos ofrece I-DEAS a la hora de mallar y crear la geometría de nuestras estructuras, por ello, que sea tan utilizado en los procesos de cálculo.

## 5\_ INTRODUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA

El proceso de introducción de la geometría es el mismo para los tres edificios. Explicaremos como se ha realizado para el modelo de la estructura de la Estación de Servicio “Los Enlaces” de Yarza.

### \_ Proceso

#### 1\_ Pajarita

\_Introduciremos los nodos principales de los pórticos, en este caso, de las pajaritas de hormigón de la estructura mediante la función *Node > Create*

\_Una vez tengamos los nodos principales procederemos a crear los nodos intermedios mediante la función *Node > Between Node*

\_ Una vez hemos creado todos los nodos de debemos crear los elementos SHELL (2D) para mallar nuestra pajarita. Usaremos la función *Element > Create* seleccionando el elemento triangular o cuadrado según sea necesario.

\_De este modo, tendremos mallada la pajarita en 2D. Para obtener la pajarita en 3D debemos extruir nuestro elementos SHELL (2D) en SOLID (3D). Para ellos usaremos la función *Element > Multiple Create > Extrude > Translate > Solid*

\_Para evitar incoherencias en el modelo debemos borrar los elementos SHELL y verificar que no hay nodos coincidentes mediante la opción *Check Mesh > Coincident Nodes*.

#### 2\_ Pórticos

\_Una vez tenemos nuestra pajarita, podemos obtener la pajarita simétrica del pórtico. Para ello usaremos la función *Element > Copy > Orient*.

\_Volveremos a usar la función *Node > Create* para introducir los nodos que nos ayudarán a crear los cables del pórtico.

\_ Usaremos la función *Element > Create* para introducir los cables de la cubierta. Los modelizaremos mediante el elemento BEAM (1D). Debemos crear el perfil del cable a usar.

\_ Una vez tenemos nuestro pórtico, podemos repetirlo “n” veces hasta crear el resto de pórticos que componen nuestra estructura. Para ello usaremos la función *Element > Copy > Orient > Translate > Distance Copy*.

#### 3 \_Cubierta

\_Por último, debemos crear la cubierta de la cubierta. Para simplificar el proceso crearemos un módulo de cubierta que luego repetiremos “n” veces hasta cubrir la estructura por completo. Para crear un módulo de cubierta debemos realizar los mismo pasos que hemos seguido para realizar una pajarita: obtener los nodos internos, mallar mediante elementos SHELL (2D), extruirlos para obtener los elementos SOLID (3D). Para obtener los nodos internos de las barras que modelizan los cables debemos usar la función *Element > Multiple Create > Subdivide Beams*.

\_ Una vez tenemos un módulo de cubierta, podemos repetirlo “n” veces hasta completar la cubierta entera usando el mismo comando que para los pórticos.

#### 4\_ Materiales

Una vez tenemos la geometría, debemos definir los materiales del modelo. En nuestro caso únicamente será necesario identificar el acero para los cables y el hormigón para los pórticos.

#### 5\_ Condiciones de contorno y cargas

Por último, debemos introducir las restricciones exteriores y las cargas que actúan sobre el modelo para, a continuación, proceder al cálculo del modelo.

